

Grado Universitario en Ingeniería Mecánica
2018-2019

Trabajo Fin de Grado

“Diseño e Implementación de un Sistema de Detección Preventiva de Obstáculos en Vehículos Tipo Turismo”

Carlos Gil García

Tutor

José María Armingol Moreno

Leganés, marzo 2019

RESUMEN

Los sistemas de detección preventiva de obstáculos son fundamentales para advertir de posibles colisiones, así como detectar la presencia de vehículos en puntos ciegos para el cambio de carril o evitar un posible descuido del conductor, entre otras.

En definitiva, conllevan al desarrollo y evolución de la conducción autónoma, más segura e independiente.

Si el conductor no toma las medidas adecuadas a tiempo existiendo posibilidad de riesgo de accidente, los sistemas integrados tomarán el control del vehículo para evitar que se produzca en la medida de lo posible.

En este trabajo se tratará de proporcionar mayor nivel de seguridad confiriendo al vehículo la toma de decisiones y evitar accidentes derivados, la mayoría de ellos, por el error humano.

Se analizarán aspectos generales básicos de automatización e inteligencia aplicados a vehículos y posteriormente se hará un estudio en profundidad sobre tecnologías empleadas, sistemas basados en estas tecnologías y optimización de los mismos para el ejemplo en concreto.

Se detallarán los recursos y elementos empleados, así como los programas necesarios para el diseño y programación, y se elaborará un prototipo que será ensayado en condiciones reales de funcionamiento.

ABSTRACT

Preventive detection systems of elements are fundamental for warning of possible collisions, as well as the presence of vehicles in blind points for the lane change and to avoid a possible neglect of the driver.

In short, it carries to the development and evolution of autonomous, safer and independent driving.

If the driver does not take the cautions at time, there is a possibility of accident risk. The integrated systems will take control of the vehicle to prevent it from happening as far as possible.

In this project, it will be tried to provide a higher safety level in the vehicle, making decisions and avoiding accidents, most of them due to human error.

Basic general aspects of automation and intelligence applied to vehicles will be analyzed and will make an in-depth study of the technologies used, the systems based on these technologies and their optimization for the specific example.

The resources and elements used are detailed, as well as the programs needed for the design and programming, and a prototype will be produced for testing it under real operating conditions.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría mostrar mi mayor agradecimiento a todos aquellos que me apoyaron y confiaron en mí durante la elaboración del trabajo final de carrera.

En primer lugar, agradecer al profesor y tutor personal del proyecto **José María Armingol Moreno** quien me ha guiado en las distintas fases del proyecto, quien ha secundado la idea del proyecto desde el primer día y me ha facilitado los recursos necesarios para la investigación. En definitiva, ha sido un placer compartir esta etapa con él.

En segundo lugar, me gustaría agradecer a mis familiares y amigos quienes han supuesto una gran influencia y me han permitido una dedicación diaria con constancia y motivación.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos y consideraciones a tener en cuenta.....	2
1.2. Idea de funcionamiento del sistema de prevención de obstáculos	3
1.3. Determinación del producto y necesidades a satisfacer.....	4
2. AUTOMÓVILES CONECTADOS/AUTÓNOMOS	6
2.1. Compañías en el sector del vehículo autónomo	7
2.2. Regulación del coche autónomo en la Unión Europea	14
3. TIPOS DE SENSORES Y SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA.....	15
3.1. Tipos de sensores.....	15
3.2. Selección de la tecnología.....	18
3.3. Estudio de mercado	18
3.3.1. RADAR	19
3.3.2. LiDAR	26
3.4. Selección del sensor.....	32
4. INTRODUCCIÓN AL LIDAR Y CONOCIMIENTOS AVANZADOS	34
4.1. Historia.....	34
4.2. Principios físicos y características de la tecnología LiDAR	34
4.2.1. Frecuencia de emisión de pulsos.....	35
4.2.2. Dispersión o divergencia del rayo	35
4.2.3. Ángulo de incidencia.....	36
4.2.4. Intensidad (irradiancia).....	37
4.2.5. Reflectividad y reflectancia	38
4.3. Configuración de un sistema LiDAR básico.....	39
4.3.1. Módulo transmisor	40
4.3.2. Módulo receptor.....	40
4.4. Normativa vigente	41
5. DISEÑO	42
5.1. Componentes.....	42
5.1.1. Placa Arduino MEGA 2560 Rev3	42
5.1.2. Sensor Leddar One	43
5.1.3. Sensor FSR	44
5.1.4. LCD 20X4 I2C.....	45

5.1.5. Buzzer.....	46
5.1.6. Led.....	47
5.2. Montaje del sistema	47
5.2.1. Sistema eléctrico	48
5.2.2. Sistema mecánico.....	50
5.2.3. Reglamentación y homologación de vehículos.....	56
6. PUESTA EN MARCHA Y PROGRAMACIÓN	58
6.1. Cálculo de la distancia	58
6.2. Cálculo de la velocidad	60
6.3. Cálculo del tiempo.....	61
7. IMPACTO ECONÓMICO	63
7.1. Costes de materiales	63
7.2. Costes de fabricación	63
7.3. Costes de personal	65
7.4. Costes totales.....	66
8. CONCLUSIONES Y FUTUROS ESTUDIOS	68
8.1. Conclusiones	68
8.2. Futuros estudios.....	68
9. BIBLIOGRAFÍA	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. Víctimas en accidentes de tráfico desde 1993. DGT, Anuario Estadístico de Accidentes.....	1
Fig. 2.2. Niveles de conducción autónoma.	7
Fig. 2.3. Sensores integrados en el sistema Drive Pilot del Mercedes-Benz Clase E. [4].	8
Fig. 2.4. Disposición de sensores de control integrados en un Audi A8. [5].	8
Fig. 2.5. Radio de actuación del sistema de prevención de colisión del Tesla Model S. [6].	9
Fig. 2.6. Ford Mondeo autónomo con estructura y sensores en la parte superior. [7].	9
Fig. 2.7. Volkswagen I.D. Concept en modo de conducción autónoma. [8].	10
Fig. 2.8. Vehículo autónomo de Google, Waymo. [9].	11
Fig. 2.9. BMW i3 PCP presentado en el Mowile World Congress. [10].	12
Fig. 2.10. Superdeportivo NIO EP9 circulando sin piloto en el circuito de Las Américas. [11].	13
Fig. 2.11. Diseño futurista de la Yamaha Motoroid. [12].	13
Fig. 3.12. Automóvil autónomo. Tipos de sensores y rango de cobertura según su tecnología.....	15
Fig. 3.13. Mapa de reconocimiento en cubos 3D y cambio de color por distintas alturas. [14].	17
Fig. 3.14. Sistema de radares frontales, MRR Y LRR, de Bosch combinados. [15].	20
Fig. 3.15. MRR trasero de Bosch y detección de punto muerto con otros vehículos. [16].	20
Fig. 3.16. Rango de acción lateral y trasero combinado del Delphi SRR2. [17].	24
Fig. 3.17. Rango de actuación del Delphi ESR .5. Medio y largo alcance combinados. [18].	25
Fig. 3.18. Actuales compañías LiDAR en el mercado vs. Investigación y desarrollo. [19].	27
Fig. 3.19. Características según configuración del leddarvu-8. [20].	29
Fig. 3.20. CARACTERÍSTICAS SEGÚN CONFIGURACIÓN DEL LEDDAR M16. [21].	29
Fig. 4.21. Apertura del haz de luz provocada por la divergencia de la transmisión de la luz.	35
Fig. 4.22. Contacto del haz de luz sobre la superficie con una inclinación θ	37
Fig. 4.23. Elementos de funcionamiento en un sistema LiDAR convencional.	39
Fig. 4.24. Composición interna de una configuración LiDAR básica.	39
Fig. 5.25. Gráfica de la variación de resistencia en función de la fuerza. [25].	45
Fig. 5.26. Dorsal de una pantalla LCD con el módulo I2C integrado.	46
Fig. 5.27. Representación de las conexiones por Fritzing y esquema del circuito eléctrico.	48
Fig. 5.28. Diseño en Fritzing de la placa para su impresión y placa PCB impresa.	49
Fig. 5.29. Placa PCB montada sobre la placa de Arduino y con los componentes externos conectados.	50
Fig. 5.30 Diseño conceptual del prototipo. Geometría inspirada en los radares de velocidad.	51
Fig. 5.31 Inclinación β de un plano que produce una desviación de β sobre el rayo incidente	51
Fig. 5.32. Ubicación teórica de los orificios en el cristal/metacrilato para acoplar el Leddar One.	52
Fig. 5.33 Soporte especial para el Leddar One preparado para su impresión 3D.	52
Fig. 5.34 Soporte impreso y montado en el sensor.	53
Fig. 5.35. Soporte tipo escuadra para la unión del soporte del Leddar one con el cristal/metacrilato.	53
Fig. 5.36. Representación del conjunto de soportes, el sensor, y el metacrilato.	54
Fig. 5.37. Representación del prototipo final diseñado con Solid Edge ST9.	55
Fig. 5.38. Resultado final del prototipo fabricado, ensamblado, pintado y funcionando.	56
Fig. 5.39. Vista del interior del prototipo. Distribución de los componentes por la estructura.	56

Fig. 6.40. Método de reflexión directa para la medición con el procedimiento TOF.....	58
Fig. 6.41. Intervalo de tiempo de recepción de pulso.	59
Fig. 6.42. Pantalla LCD mostrando resultados obtenidos en tiempo real en una prueba.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1. LISTA DE EXIGENCIAS SEGÚN LAS NECESIDADES.	4
TABLA 3.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE RADARES BOSCH.....	21
TABLA 3.3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS RADARES CONTINENTAL LARGO ALCANCE...22	
TABLA 3.4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS RADARES CONTINENTAL CORTO ALCANCE...22	
TABLA 3.5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL RADAR AUTOLIV.....	23
TABLA 3.6. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE RADARES AUTONOMOUSSTUFF.	25
TABLA 3.7. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL RADAR DELPHI ESR 2.5.	26
TABLA 3.8. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE SISTEMAS LIDAR VELODYNE.	28
TABLA 3.9. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE SISTEMAS LIDAR LEDDARTECH.	30
TABLA 3.10. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SISTEMA LIDAR OUSTER.	31
TABLA 3.11. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SISTEMA LIDAR VALEO.	31
TABLA 3.12. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SISTEMA LIDAR GOEMBED.	32
TABLA 4.13. REFLECTIVIDAD (%) DE ALGUNOS MATERIALES.	38
TABLA 5.14. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ARDUINO MEGA REV3.	43
TABLA 5.15. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS LEDDAR ONE.	44
TABLA 5.16. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS FSR.	45
TABLA 5.17. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS LCD.	46
TABLA 5.18. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS BUZZER.	47
TABLA 5.19. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS LED 5V.	47
TABLA 7.20. COSTES DE MATERIALES.	63
TABLA 7.21. COSTES DE FABRICACIÓN.....	65
TABLA 7.22. COSTES DE PERSONAL.....	66
TABLA 7.23. COSTES TOTALES.	66

LISTA DE ABREVIATURAS

ACC	Adaptive Cruise Control (Control de crucero adaptativo)
BOE	Boletín Oficial del Estado
CEPE (UNECE)	Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa
CTA	Cross Traffic Alerts (Alertas de tráfico cruzado)
E/S	Entradas / Salidas
EBA	Emergency Brake Assist (Asistente de frenado de emergencia)
EEUU	Estados Unidos
Euro NCAP	European New Car Assessment Programme (Programa europeo de evaluación de automóviles nuevos)
FCW	Forward Collision Warning (Alerta de colisión frontal)
FOV	Field Of View (Campo de visión)
FSR	Force Sensing Resistor (Resistencia de detección de fuerza)
GLONASS	Sistema Global de Navegación por Satélite. Acrónimo en ruso
GND	Ground (Toma de tierra)
GPS	Global Positioning System (Sistema de posicionamiento global)
HAD	Highly Automated Driving vehicle (Vehículo de conducción altamente automatizado)
I2C	Inter-Integrated Circuit (Inter-circuitos integrados)
ICSP (ISP)	In-Circuit Serial Programming (Programación serial en circuito de corriente alterna)
IEC	International Electrotechnical Commission (Comisión Electrotécnica Internacional)
INTRAS	Instituto de Tráfico y Seguridad Vial
ISA	Intelligent Speed Adaptation (Adaptación de velocidad inteligente)
ISO	International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización)
kB	Kilo Bytes
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Amplificación de luz por emisión estimulada de radiación.)
LCD	Liquid Crystal Display (Pantalla de cristal líquido)
LIDAR	Laser Imaging Detection and Ranging (Detección y rango de imágenes láser)
LRR	Long Range Radar (Radar de largo alcance)
MHZ	Mega Herzios
MINECO	Ministerio de Economía y Competitividad
MRR	Mid Range Radar (Radar de medio alcance)
MRU	Movimiento rectilíneo Uniforme
OTA	Over The Air (Por el aire)
PCB	Printed Circuit Board (Placa de circuito impreso)
PDF	Portable Document Format (Formato de documento portable)
RADAR	Radio Detection And Ranging (Detección y radio de radio)
RS-274X (Extended Gerber)	Formato estándar para la fabricación de un circuito impreso
RS-485	Estándar de comunicaciones a altas velocidades
RX (RD)	Recepción de datos
SAE	Society of Automotive Engineers (Sociedad de Ingenieros Automotrices)
SCL	Serial Clock (Reloj serial)
SDA	Serial Data (Datos seriales)
SONAR	Sound Navigation And Ranging (Navegación y rango de sonido)

STL	Standard Triangle Language (Lenguaje de triángulo estándar)
SVG	Scalable Vector Graphics (Gráficos vectoriales escalables)
TX (TD)	Transmisión de datos
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Transmisor-Receptor Asíncrono Universal)
UAV (VANT)	Unmanned Aerial Vehicle (Vehículo aéreo no tripulado)
UE	Unión Europea
USB	Universal Serial Bus (Bus Universal en Serie)
VCC	Voltaje de Corriente Continua

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto surge debido a la gran cantidad de accidentes, tanto leves como de mayor importancia, producidos por la apertura de alguna de las puertas del vehículo en circunstancias donde se puede producir una colisión con el paso de otro vehículo.

Estos accidentes son casos reales que se producen a nivel global y la mayoría de ellos son fácilmente evitables.

Según un artículo publicado por RTVE Noticias en noviembre del año 2018, que recopila información de la Agencia de las Naciones Unidas, se citan los siguientes datos [1].

“Cada 25 segundos fallece una persona en todo el mundo por un accidente de tráfico” ... “Unos siniestros que ocasionan 1,25 millones de víctimas mortales al año” ... “El 90% de las víctimas pierden la vida en países de renta media o baja, que cuentan con el 54% de los vehículos matriculados, y un 49% son usuarios vulnerables de las carreteras, como motoristas, peatones y ciclistas”.

En la siguiente figura se muestra la evolución de las víctimas de accidentes de tráfico desde 1993 en España:

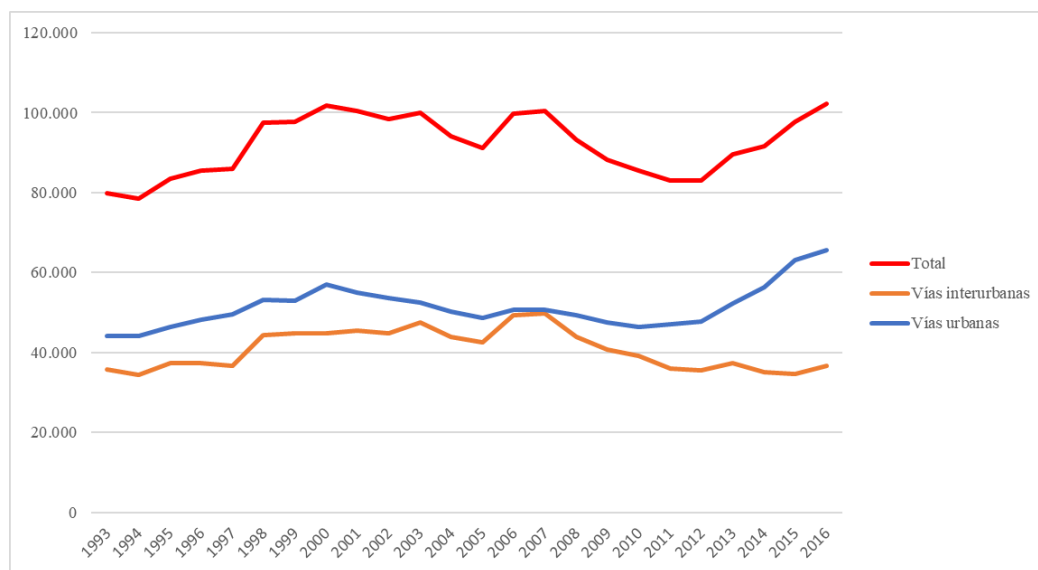


Fig. 1.1. Víctimas en accidentes de tráfico desde 1993. DGT, Anuario Estadístico de Accidentes.

Es por esto que, desarrollando un sistema capaz de detectar circunstancias potencialmente peligrosas, se puede proporcionar al vehículo la capacidad de predecir y prevenir riesgos garantizando la seguridad y confianza de las posibles víctimas implicadas, tanto los integrantes del vehículo como los integrantes de otros vehículos, ciclistas y/o peatones.

Para ello, ha sido necesario investigar sobre los fallos más comunes que producen estos accidentes, así como idear posibles alternativas que consigan los propósitos requeridos. También se han considerado todos los elementos presentes en el entorno y las condiciones reales de aparición.

En definitiva, para desarrollar un sistema basado en proporcionar seguridad, ha sido imprescindible conocer todas las posibles situaciones en las que se podría producir una colisión, independientemente de si los ocupantes del vehículo toman todas las medidas preventivas o no.

Además, se han estudiado todas las tecnologías posibles para el desarrollo del sistema según su viabilidad técnica/económica y se valoraron los fenómenos físicos presentes que determinaban qué tecnologías eran más óptimas para el sistema en concreto.

También ha sido necesario determinar a qué requisitos técnicos y legales está sujeto el producto final a escala nacional, UE y global de acuerdo a la normativa de homologación y reglamentación de vehículos vigente.

Finalmente, una vez considerados todos los parámetros de diseño y seleccionado el tipo de tecnología, se diseñó un prototipo de sistema de prevención inteligente de obstáculos que cumpliera con los propósitos y requisitos establecidos.

Este proyecto se ha llevado a cabo mediante una serie de actividades las cuales se han realizado en orden cronológico. En el Anexo A, se adjuntan una tabla y un diagrama de Gantt que exponen cada actividad realizada, la fecha de inicio y fin de cada actividad y su duración en días.

La duración del proyecto ha supuesto un total de 161 días, lo que equivale a unos 6 meses aproximadamente.

1.1. Objetivos y consideraciones a tener en cuenta

El objetivo principal de este proyecto está enfocado en un sistema, compuesto por distintos sensores, cuya principal función es el bloqueo de cualquier puerta de un turismo cuando está aparcado en el momento en el que uno de los acompañantes se disponga a salir en una situación de peligro, como la que representa el que esté pasando algún vehículo en sus proximidades.

Este sistema de seguridad debe funcionar de forma correcta independientemente de las condiciones climatológicas (lluvia, tormenta, niebla...), si bien estas generan un mayor riesgo a que el ocupante abra la puerta sin detectar posibles peligros externos.

Además, debe ser práctico en situaciones exclusivas donde las condiciones de visión del ojo humano son menos efectivas como encontrarse a contraluz (amanecer/atardecer), si otro vehículo no lleva las luces encendidas en condiciones de poca luz o no detección de otro vehículo por estacionar en curva.

También se busca evitar que alguno de los ocupantes siendo consciente del posible peligro abra la puerta imprudentemente o que, por encontrarse distraído, actúe negligentemente.

Las puertas se tienen que bloquear siempre que se detecte el paso de cualquier vehículo en las proximidades y se desbloquean automáticamente cuando se detecte vía libre para salir

Sólo es necesario que se detecte el carril más próximo, ya que la distancia de los otros carriles no supone ningún peligro, permitiendo que se pueda abrir la puerta con seguridad

El sistema se ha diseñado teniendo en cuenta las señales recibidas desde bicicletas hasta camiones, desde una calle residencial hasta autopistas o carreteras convencionales. Esto permite dotar al sistema de gran versatilidad y ofrecer seguridad en cualquier condición posible e imaginable.

Todas estas consideraciones dependen, a su vez, de los factores de diseño y los fenómenos físicos presentes, teniendo en cuenta los cuales, se ha tratado de optimizar el sistema tecnológica y económicamente.

1.2. Idea de funcionamiento del sistema de prevención de obstáculos

El sistema de sensores debe estar siempre encendido, independientemente de si el vehículo está parado o en movimiento, incluso si se ha parado el motor. Esto le permite al sistema ser práctico para diversas aplicaciones.

Se han diferenciado dos posibles funciones del sistema que conmutan conforme al estado de movimiento del vehículo. Si el vehículo se encuentra en movimiento, el sistema funciona como *asistente en el cambio de carril* con las puertas bloqueadas¹, pero si el vehículo se detiene, las puertas se desbloquean y se activa el modo *detección preventiva de obstáculos*, sobre el que se enfoca el presente proyecto.

En este modo, el sistema debe ser capaz de reconocer peligros potenciales en el exterior del vehículo, bloqueando las puertas si considera que puede resultar peligroso salir en ese momento.

De esta forma, si el sensor detecta que pasa otro vehículo por el lateral, y el sistema considera que la velocidad relativa con el otro vehículo y su distancia son suficientes para que no dé tiempo a salir del vehículo, bloquea automáticamente la puerta en la que haya un ocupante sentado.

Un ejemplo de una posible situación sería, el caso en el que un vehículo con un único ocupante (conductor) aparca en el carril derecho de una avenida y cuando se dispone a salir pasa otro vehículo por el lateral izquierdo. En ese instante el sistema bloquearía sólo la puerta del conductor y no la trasera. Esto permite acceder a una persona del exterior al interior del vehículo, pero sin dejar salir a la del interior.

Esto se debe principalmente a que, a una persona en el exterior le resulta fácil ver si viene otro vehículo y si es seguro abrir la puerta, y si decide hacerlo tendrá cuidado de no abrir la puerta al completo ya que puede ser una situación peligrosa. Sin embargo, si la persona se encuentra dentro, no tiene tanto control del exterior ni lo percibe de la misma manera, aun teniendo el máximo cuidado posible.

¹ De serie, el vehículo tiene siempre las puertas bloqueadas cuando esté en marcha, pudiendo ser desbloqueadas manualmente por el conductor en caso de emergencia.

Una vez deje de detectar el otro vehículo y considere que el peligro ha pasado, se desbloquea la puerta de nuevo. Esta aplicación se ha configurado para que funcione en cada lateral del vehículo de forma independiente, ya que pueden producirse diferentes peligros en ambos lados.

1.3. Determinación del producto y necesidades a satisfacer

Una vez conocidos los requisitos necesarios, las condiciones de operación y los objetivos a tener en cuenta, para determinar el producto se ha realizado una lista de exigencias según criterios y funcionalidades. Esta lista se divide en distintos criterios del producto, y en cada uno de ellos se consideran las características más importantes para su desarrollo.

TABLA 1.1. LISTA DE EXIGENCIAS SEGÚN LAS NECESIDADES.

LISTA DE EXIGENCIAS			Proyecto:
			Detección preventiva de obstáculos
Nº	Motivo	Descripción	Anotaciones
FUNCIÓN PRINCIPAL			
1	E	Detectar posición y velocidad de otros vehículos	
2	D	Captar únicamente el carril más cercano al vehículo	
3	E	Capacidad de respuesta inmediata	Sistema de actuación rápido
4	E	Parametrización del entorno constante	
5	E	Amplio rango de temperatura operativa	Capacidad de trabajar en condiciones extremas
DISEÑO Y FABRICACIÓN			
6	D	Diseño orientado a facilitar los procesos de fabricación	Moldeado, mecanizado, etc.
7	E	Número de componentes reducido	
8	E	Reducir costos de fabricación	Optimización de diseño
9	E	Reducir costos de montaje	Simplicidad de uniones
10	D	Facilidad de acoplamiento en el vehículo	
11	E	Seguridad y normativa	Conformidad con la normativa técnica aplicable
12	E	Calidad en el funcionamiento y aspecto del producto final	Producto robusto y funcionamiento perfecto
13	E	Compatibilidad con variaciones de diseño según cada caso	Diseño pensado para facilitar su modificación
ENERGÍA			
14	E	Fuente de energía la batería de 12 voltios del vehículo	
USO			
15	E	Avisos claros y entendibles por los ocupantes del vehículo	
16	E	Posibilidad de desactivación en caso de emergencia	Sistema de apertura manual si fuese necesario
DIMENSIONES Y PESO			
17	D	Sistema compacto de dimensiones reducidas	Mayor opción de zonas para su instalación
18	D	Peso reducido	Que no afecte al rendimiento del vehículo
PRECIO PRODUCTO FINAL			
19	E	Precio reducido	Incorporación en cualquier gama de vehículo
MANTENIMIENTO			
20	E	Sistema modular de fácil conexión/desconexión de componentes	

Se han identificado con una E (Exigencia) si esa característica es obligatoria o una D (Deseo) si esa característica sería deseable que estuviese, pero no es obligatorio.

Después de un estudio de todas las necesidades, se han detectado un total de 20 consideraciones a tener en cuenta en este proyecto, de las cuales 15 son motivo de exigencia y obligatorias que debe cumplir el producto.

Durante el desarrollo del proyecto se han seguido estas exigencias como guías de referencia para conseguir que el producto sea conforme a las exigencias establecidas. No obstante, también se han tratado de alcanzar las otras 5 deseables para perfeccionar el sistema final.

2. AUTOMÓVILES CONECTADOS/AUTÓNOMOS

Según el sistema de evaluación de Euro NCAP, a partir de 2016, los fabricantes de automóviles cuyo objetivo sea una calificación máxima de cinco estrellas, deben incorporar en sus nuevos vehículos una función predictiva de colisiones entre vehículos y peatones. [2].

Es por esto que varios fabricantes de vehículos han optado por la incorporación de diversidad de sensores que, en combinación unos con otros, confieran al vehículo cierta autonomía con respecto al conductor.

Un vehículo autónomo es aquel capaz de circular en cualquier tipo de vía en ausencia de un conductor. Tiene que ser capaz de percibir el espacio que le rodea, predecir y evitar posibles riesgos de accidente, además de circular siguiendo la señalización y normas de circulación vial.

Según el organismo de normalización del automóvil SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices), la autonomía de un vehículo está dividida en 6 niveles, desde el más bajo en el que el vehículo es controlado sólo por el conductor hasta un control total del vehículo. [3].

Nivel 0: el conductor es quien maneja y controla el vehículo, y éste sólo emite alarmas de aviso.

Nivel 1: el vehículo toma el control de forma muy básica con tecnologías como el control de velocidad o el asistente de mantenimiento de carril.

Nivel 2: el vehículo se considera como semiautónomo y le permite tomar el control, con el conductor pendiente, en determinadas circunstancias de forma más inteligente como la capacidad de mantenerse en el carril sin líneas.

Nivel 3: a partir de este nivel, el vehículo es capaz de circular independientemente en entornos controlados como autopistas sin necesidad de asistencia por parte del conductor. En este nivel se exige que el conductor no se desentienda de prestar atención en caso de tomar el control del vehículo, ya que en entornos no controlados el vehículo no será capaz de actuar pertinentemente.

Nivel 4: El vehículo tiene total independencia en regiones limitadas que le aportan la suficiente información para circular de forma autosuficiente. No obstante, en zonas donde no sea capaz de recopilar datos, será necesario la presencia del conductor.

Nivel 5: El vehículo es capaz de tomar el control total de conducción por cualquier zona sin necesidad de depender de supervisión humana.

En este nivel el vehículo carece de elementos de control para el conductor como el volante o los pedales, en este caso simplemente se indica al vehículo a donde se quiere ir y éste se desplazará con total independencia.

Actualmente, dependiendo del área y/o país, estos vehículos no pueden circular libremente en función de las restricciones legales que se apliquen.

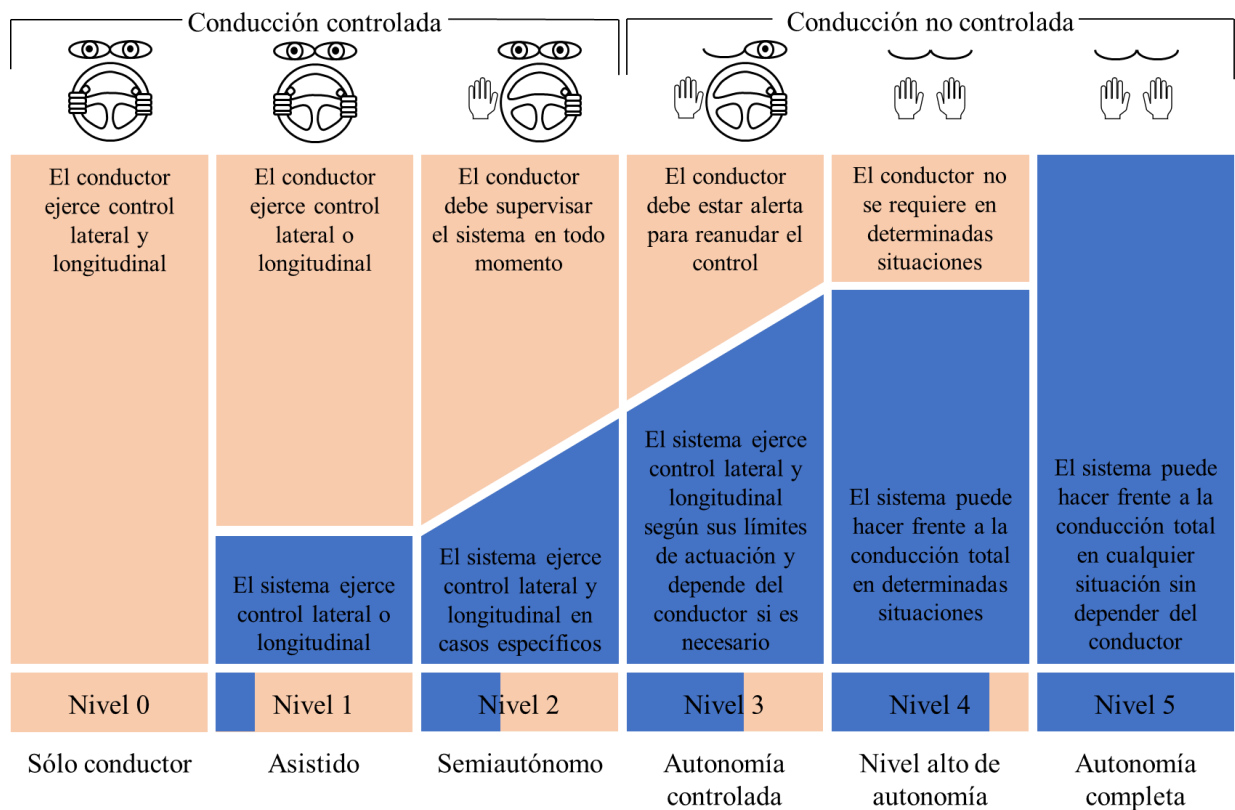


Fig. 2.2. Niveles de conducción autónoma.

2.1. Compañías en el sector del vehículo autónomo

Cada vez son más los fabricantes que se introducen en el mercado del vehículo conectado y/o autónomo, los más conocidos por aportar a sus modelos sistemas muy avanzados son:

Mercedes-Benz Clase E: de nivel de autonomía 2 o semiautónomo, fue el primero en 2016 capaz de evitar salirse de la calzada sin la necesidad de que existan líneas en el carril gracias a su sistema *Drive Pilot*.

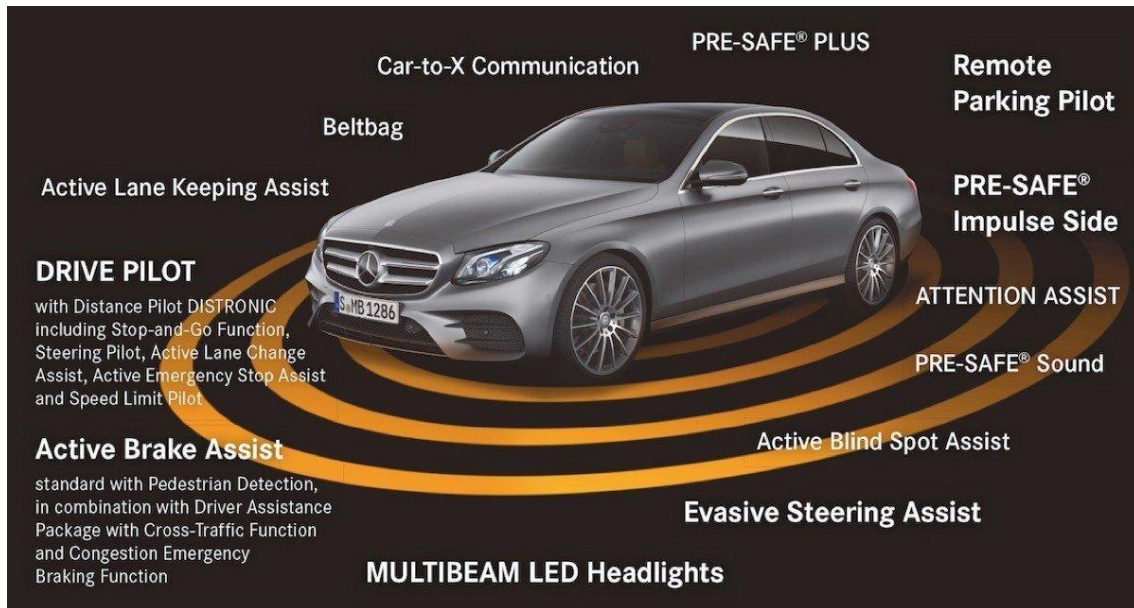


Fig. 2.3. Sensores integrados en el sistema Drive Pilot del Mercedes-Benz Clase E. [4].

Audi A8: este fue el primer vehículo en alcanzar el nivel 3 o nivel de autonomía controlada, con el que el vehículo podía circular de forma autónoma siempre que el conductor tuviera las manos en el volante.

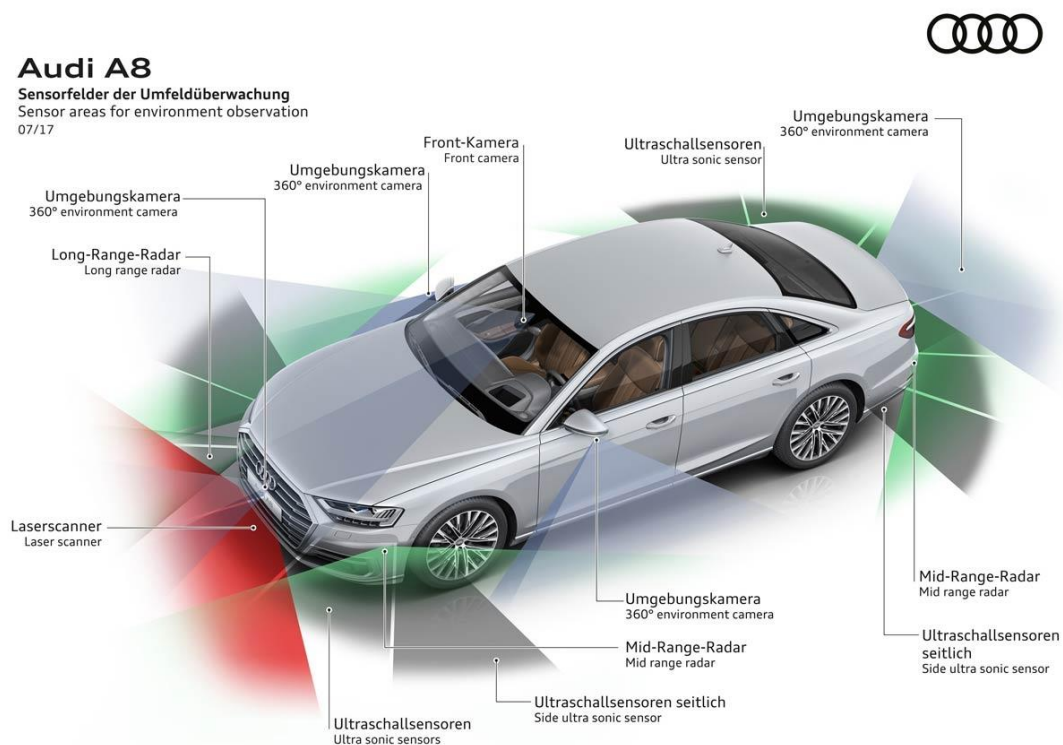


Fig. 2.4. Disposición de sensores de control integrados en un Audi A8. [5].

Tesla Model S: también ofrece un nivel de autonomía 3 (actualizable al nivel 4 vía OTA) gracias a su sistema Autopilot, el cual funciona muy similar al sistema de Audi. Cuenta con una gran cantidad de sensores dispuestos alrededor del vehículo que le otorgan una amplia cobertura de detección en el entorno en el que se rodea.

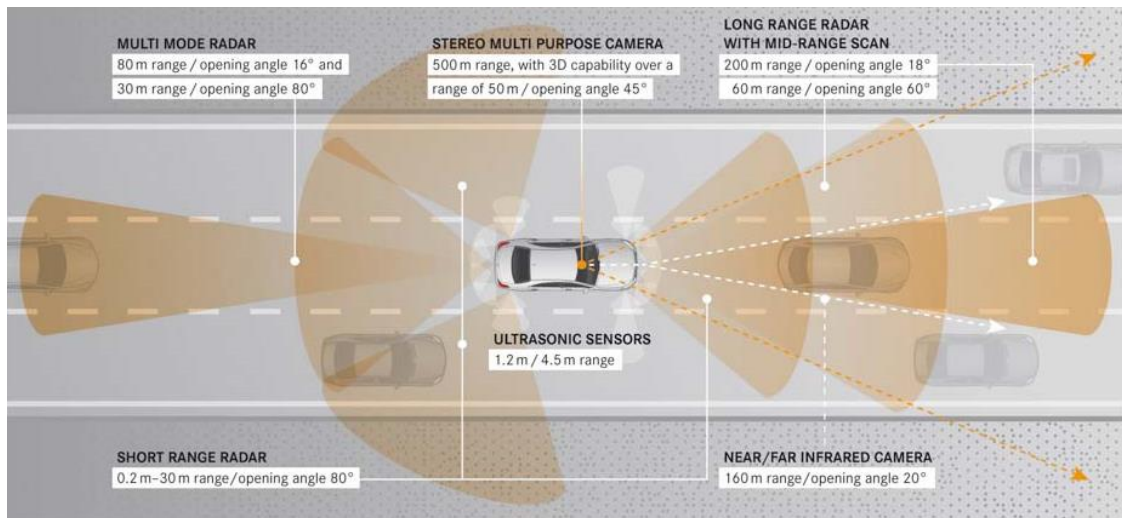


Fig. 2.5. Radio de actuación del sistema de prevención de colisión del Tesla Model S. [6].

Ford Mondeo: pasando a conceptos no comercializados encontramos uno que ya se ha llevado a la carretera, como es el modelo de Ford.

La desventaja es que necesita 4 sensores (uno en cada esquina) y que estos se colocan sobre una estructura de acero en el techo y sobresalen rompiendo la estética y aerodinámica del vehículo.



Fig. 2.6. Ford Mondeo autónomo con estructura y sensores en la parte superior. [7].

Volkswagen I.D. concept: Este simplemente se trata de un prototipo. Destaca principalmente por ser capaz de “disimular” los sensores. Estos se encuentran ocultos en el techo y cuando se activa el modo de conducción autónoma estos se elevan, posteriormente cuando se desactive descenderán quedando ocultos en su carrocería.



Fig. 2.7. Volkswagen I.D. Concept en modo de conducción autónoma. [8].

Google: Aunque Google ha lanzado varios prototipos de vehículos autónomos, incluso algunos sin pedales ni volante, finalmente el primero en ser una realidad es el Waymo. Es un vehículo grande de tipo furgoneta que permite llevar a los ocupantes que contraten el servicio desde un punto A hasta un punto B, indicando solo a donde se quiere ir.

Se trata de un vehículo de nivel 4, que le permite circular de forma independiente en regiones limitadas de estos estados. Su aspecto físico muestra la cantidad de sensores implementados por la carrocería que les permiten tomar el control en todo momento. Ya se han puesto en marcha en algunos estados de los EEUU para circular libremente, pero con el conductor dispuesto a tomar el control si se diera la ocasión.



Fig. 2.8. Vehículo autónomo de Google, Waymo. [9].

BMW i3 PCP o Personal CoPilot: presentado recientemente en el Mobile World Congress 2018 de Barcelona, es el primero capaz de alcanzar la conducción autónoma nivel 5.

Se trata de un prototipo totalmente conectado capaz de aprovechar todos sus recursos para conducirse por sí solo. En su interior se puede observar que mantiene el volante, por lo que podría conducirse también de forma manual si el usuario así lo deseara, y también encontramos dos pantallas táctiles desde las cuales se podrá controlar el vehículo como poner las luces largas, tocar el claxon o bloqueo de puertas, aparte de poder acceder a contenido multimedia o trabajar.



Fig. 2.9. BMW i3 PCP presentado en el Mowile World Congress. [10].

NIO EP9: aunque este automóvil de la empresa china NextEV no es tan conocido, es necesario destacarlo por ser el más rápido del mundo en conducción 100% autónoma.

En febrero de 2017, este superdeportivo eléctrico fue capaz de completar una vuelta al circuito de Las Américas en Texas alcanzando una velocidad máxima de 257 km/h sin piloto.

Si bien es cierto que su modo de conducción autónoma estaba adaptado para circuito y no para zonas urbanas donde el sistema predictivo debe analizar más variables, es importante considerar las altas velocidades que obligaban al vehículo a ser capaz de examinar el entorno y tomar decisiones de forma muy rápida y eficaz.



Fig. 2.10. Superdeportivo NIO EP9 circulando sin piloto en el circuito de Las Américas. [11].

Yamaha Motoroid: también las compañías están desarrollando conceptos de motocicletas autónomas. Es el caso de Yamaha con su modelo Motoroid, que ha diseñado un concepto futurístico de moto que es capaz de circular de forma independiente y mantenerse verticalmente, además de reconocer a su dueño y seguirlo. Este modelo combina tecnología en el sector automovilístico autónomo e inteligencia artificial, la cual se basa en el concepto de “machine learning” o aprendizaje de máquinas para ir mejorando sus capacidades.

Otro ejemplo anterior a este modelo, fue la Honda Riding Assist, un concepto con aspecto menos futurístico, pero con funcionalidades similares.



Fig. 2.11. Diseño futurista de la Yamaha Motoroid. [12].

2.2. Regulación del coche autónomo en la Unión Europea

Considerando que el sistema que se va a desarrollar se incorporará a un vehículo y permitirá que actúe con cierta o total independencia, es importante considerar el impacto legal de la movilidad del coche autónomo en las distintas regiones.

Información obtenida según la publicación del grupo de investigadores del INTRAS [13].

A escala Unión Europea (UE), la seguridad vial está muy regulada debido a los posibles peligros que puede provocar una confusión de señalización.

Si se automatiza un vehículo, se cambia por completo la regulación, debido a que los riesgos de accidente son distintos. Aunque cada Estado Miembro de la UE puede aplicar una medida regulatoria particular, la UE a través de la CEPE (Comisión Económica de las Naciones Unidas Para Europa), tiene la función de armonizar la implementación de estas tecnologías.

La normativa establece que todo vehículo en circulación deberá poseer obligatoriamente a un conductor y éste deberá controlarlo en todo momento.

Esta normativa limita el avance y desarrollo de vehículos autónomos, siendo los de niveles más altos de autonomía los más perjudicados. Sin embargo, se está preparando una nueva normativa que permita al vehículo circular sin participación del conductor, lo cual permitirá la entrada al mercado europeo de automóviles autónomos de niveles 4 y 5.

En otros países, como EEUU, depende de cada Estado el que se permita la conducción autónoma completa con un conductor alerta por si tuviese que tomar el control.

En Japón existen ciertas vías habilitadas y controladas para el uso del coche autónomo sin ayuda del conductor. No obstante, éste deberá estar disponible cuando el vehículo salga de estas zonas controladas.

3. TIPOS DE SENSORES Y SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA

Para conseguir que el coche sea capaz de reconocer el entorno es necesario dotarlo de distintos tipos de sensores. Entre la gran variedad se pueden distinguir: cámaras de vídeo, GPS, leds, sensores RADAR, sensores LiDAR, sensores de ultrasonidos, etc.

Con el fin de identificar cuáles son afines para el desarrollo de este proyecto, se estudió cada tipo de sensor y la tecnología que emplea para conocer cómo funcionan y los resultados que ofrecen.

3.1. Tipos de sensores

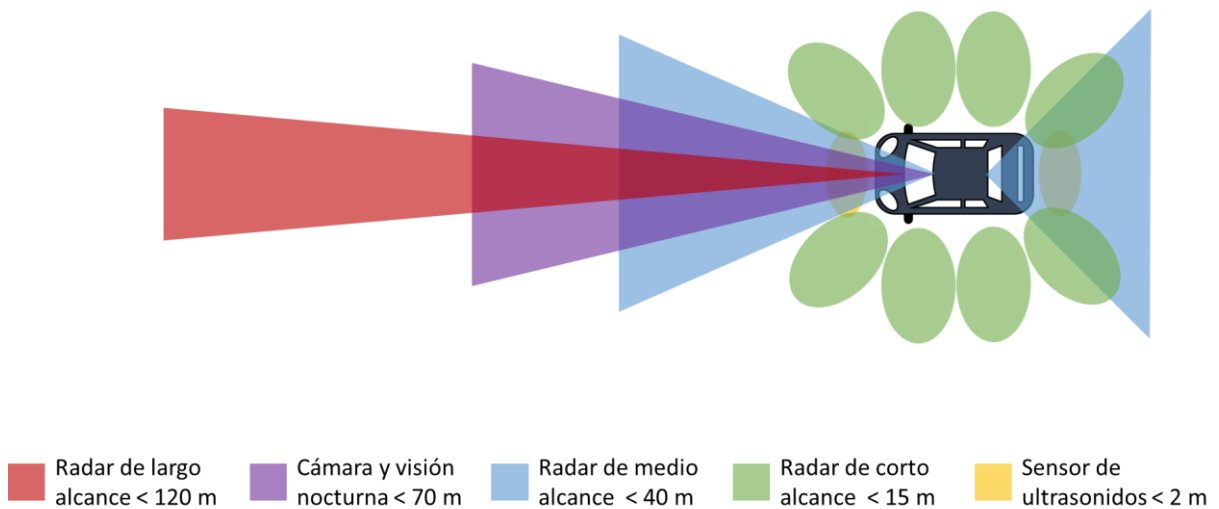


Fig. 3.12. Automóvil autónomo. Tipos de sensores y rango de cobertura según su tecnología.

SONAR (Sound Navigation And Ranging)

Emiten ondas sonoras, principalmente bajo el agua, que se reflejan sobre objetos y paredes formando ecos que son captados por un receptor.

Midiendo el tiempo transcurrido entre la emisión y recepción de la onda y conociendo la velocidad del sonido en el medio de propagación, se puede saber la distancia de un objeto.

Se utilizan principalmente para la ecolocalización de objetos en el fondo del mar, seguridad naval y detección de obstáculos para submarinos.

Sensores de ultrasonidos

Estos sensores son una variante de los SONAR con la particularidad de que las ondas sonoras que generan superan el umbral del oído humano, 20 kHz.

Debido a que estos sensores operan con frecuencias tan elevadas, detectan distancias muy exactas a bajas velocidades y a corto alcance, mientras pierden precisión a medida que se alejan del obstáculo debido a su gran dispersión.

Su principal aplicación debido a sus características es el aparcamiento asistido en automóviles.

RADAR (Radio Detection and Ranging)

Muy similar a los ultrasonidos, este sensor emite un impulso, en este caso una onda de radiofrecuencia, que rebota con el obstáculo y vuelve a un receptor. La diferencia de estos sensores con los de ultrasonidos es que éstos permiten captar obstáculos a longitudes mucho más grandes, perdiendo precisión en distancias tan cortas, en las que opera mejor el sensor de ultrasonidos.

El principio físico en el que se basa el RADAR es en el Efecto Doppler, el cual se refiere a la variación proporcional de frecuencia entre la onda emitida y la recibida, indicando que existe una diferencia de distancias entre el sensor y el obstáculo a lo largo del tiempo.

A medida que se acerca el objeto emisor, la longitud de onda disminuye, lo que da lugar a una onda de frecuencia más alta. Y a medida que se aleja, la longitud de onda aumenta y el sonido se vuelve más grave.

Esta variación de frecuencia permite al sensor conocer la distancia y la velocidad relativa de cada objeto en su radio de acción.

Una desventaja de los sensores RADAR actuales es que sólo son capaces de captar distancia en 2D. Sin embargo, se están desarrollando versiones que permiten captar obstáculos en 3D, ya que la altura puede ser relevante en diversas aplicaciones.

Los RADAR pueden ser de varios tipos según la dispersión horizontal: corto, medio y largo alcance. Esto permite afinar los resultados a obtener según la configuración y necesidades específicas.

Los radares son utilizados para medir distancias y altitudes, detección de velocidad, control tráfico aéreo, seguridad naval y aérea...

LiDAR (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging)

El LiDAR es un sistema cuyo funcionamiento es similar al de RADAR y SONAR con la diferencia que, en lugar de emitir ondas de radio, emite rayos de luz láser infrarrojo.

Se trata, por tanto, de un sistema de medición y detección de objetos mediante LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*).

Su funcionamiento consiste en lanzar millones de haces que impactan en los objetos, se reflejan y vuelven al receptor. De esta manera se obtienen “nubes de puntos” de alta densidad pudiéndose generar en tiempo real un mapa 3D alrededor del vehículo.

Sin embargo, estas formas obtenidas no son precisas; es más, el sistema reconoce a los obstáculos como cubos tridimensionales en el espacio. Para poder conseguir un mapa más detallado y distinguir cada uno de los obstáculos, el LiDAR tiene que apoyarse en cámaras

que le ayuden a distinguir cada objeto, y así saber si se trata de un peatón, una motocicleta o simplemente un obstáculo.

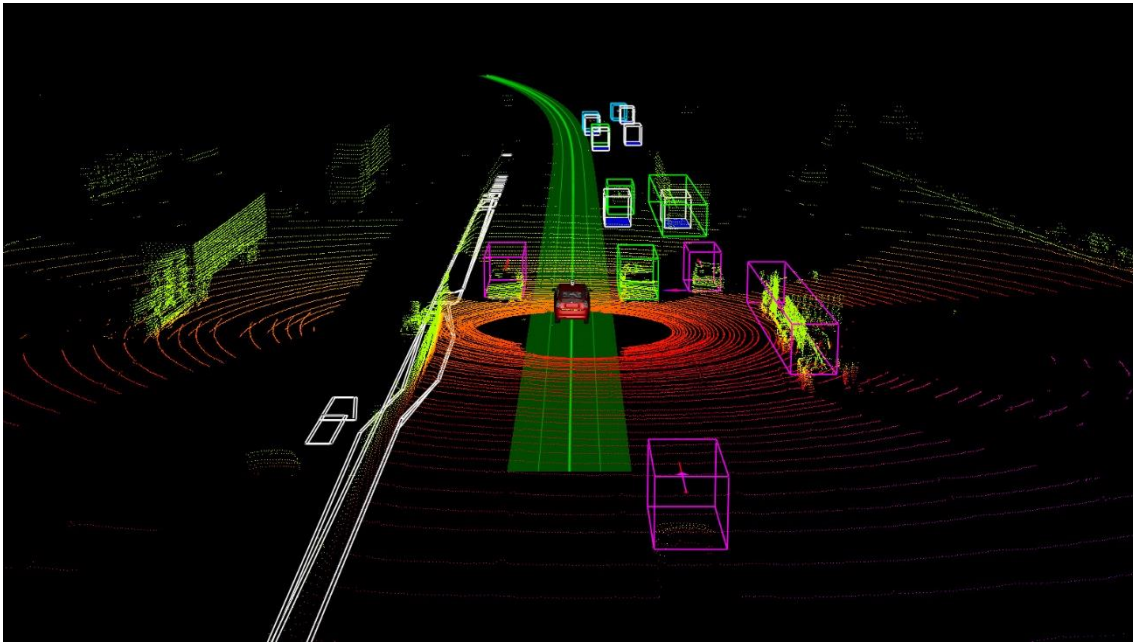


Fig. 3.13. Mapa de reconocimiento en cubos 3D y cambio de color por distintas alturas. [14].

Al igual que los sensores RADAR, el sensor LiDAR también puede basar su funcionamiento en el Efecto Doppler, ya que la luz es un tipo de onda electromagnética y los colores son ondas de distinta frecuencia. Por tanto, si el color de la luz reflejada por el objeto varía, indica que su distancia con respecto al sensor varía. El rojo, que es el de menor frecuencia, indicaría mayor distancia; mientras que el violeta, el de mayor frecuencia, indicaría menor distancia.

El LiDAR se puede caracterizar según el tipo de láser, el tipo de escaneado, si son fijos o móviles y por su capacidad de cobertura del entorno.

Aplicaciones: altimetría, escaneo de superficies, detección de velocidades y prevención de colisión, detección de velocidad del viento...

Sensores de imagen o cámaras

Captan información relevante del entorno del vehículo y mediante el procesamiento de imagen lo que permite identificar desde señales de tráfico o líneas de la calzada, hasta distinguir los distintos objetos u obstáculos presentes en las proximidades del vehículo.

Las cámaras también son muy útiles para combinarlas de modo complementario con otros sensores de medición de distancia. Esto permitirá obtener información más detallada de obstáculos en tres dimensiones, ya que con estos sensores sólo se sabe la distancia de los objetos, pero los clasifican de forma igual independientemente si se trata de un peatón o un árbol.

A diferencia del resto de sensores, los sensores de imagen son los únicos que no emiten energía sobre el obstáculo.

Sus aplicaciones son diversas como el ISA, adaptación inteligente de la velocidad, o el asistente de mantenimiento de carril, entre otras.

Otros

Existen otros sensores como el GPS y GLONAS que indican la ubicación exacta del vehículo, lo cual le permite ofrecer información adicional sobre mejores rutas a tomar, además de servir como apoyo a los demás sensores sobre el recorrido a realizar.

3.2. Selección de la tecnología

Una vez analizados todos los tipos de sensores y su respectiva tecnología, se procedió a elegir aquellos que permitían cumplir los requisitos del proyecto en concreto.

Las cámaras resultaban ser muy interesantes debido a su fácil accesibilidad en el mercado y de su reducido coste. Sin embargo, para obtener distancias y velocidades era necesario recurrir a la triangulación en estéreo. Esta triangulación implicaba cálculos y algoritmos muy precisos, lo cual podía complicar la obtención de resultados.

Por otro lado, aunque el SONAR resultaba otra opción muy interesante, tampoco era práctico ni confortable que el sensor estuviera emitiendo ondas sonoras dentro del espectro del oído humano.

Como alternativa al SONAR se consideró la opción del sensor de ultrasonidos. Pero al no poder medir grandes distancias, tampoco era idóneo para el proyecto en concreto en el que se requería obtener información de otros vehículos a mayor escala de longitud.

Es por esto que se eligieron las dos tecnologías más viables según los requerimientos: el RADAR y el LiDAR.

3.3. Estudio de mercado

Debido a que tanto LiDAR como RADAR eran opciones favorables para obtener distancias y velocidades de vehículos a medio y largo alcance, se analizaron, para ambas tecnologías, todos los productos existentes en el mercado para conocer cuáles eran los más viables según prestaciones y precio².

Actualmente existen gran variedad de productos y empresas en los sectores LiDAR y RADAR. Sin embargo, sólo se ha realizado un análisis de mercado acorde a los productos

² Aunque algunos productos se vendan fuera de la UE, los precios obtenidos se muestran en euros (€) haciendo una conversión aproximada de la moneda del país de venta. No se ha tenido en cuenta el precio de los accesorios necesarios para cada producto ni los costes por gastos de envío. Son susceptibles a cambios por parte de la empresa o variaciones en el mercado con el tiempo.

más afines al proyecto. Es por esto que, no se han seleccionado todos los productos existentes y se ha simplificado la búsqueda según las necesidades especificadas.

3.3.1. RADAR

Aunque estos sensores se usan en un gran campo de aplicaciones, existe una parte muy enfocada al sector automovilístico, los cuales están especialmente diseñados para su integración en el vehículo.

3.3.1.1. Bosch

Bosch es actualmente líder en el mercado debido a la gran experiencia y fiabilidad de sus productos, así como la capacidad de innovación y desarrollo tecnológico.

Largo Alcance: LRR4 o Long-Range Radar Sensor

En su cuarta generación, el LRR4 es un RADAR multimodal monoestático con seis antenas fijas de RADAR.

Cuatro de ellas son centrales y están especializadas para registrar datos a altas velocidades, por lo que su rango de captación es de largo alcance con una baja apertura.

Las otras dos antenas en los laterales ofrecen una apertura mayor y menor alcance para detectar vehículos a los laterales que abandonan o se incorporan a un carril.

Medio Alcance: MRR o Mid-Range Radar Sensor

El MRR es un RADAR multimodal biestático con cuatro canales de recepción independientes. Esto permite que el MRR se configure con antenas independientes para diferentes direcciones, lo que mejora la precisión de la medición angular y permite ajustar el campo de visión del RADAR según la situación.

MRR delantero

Cuenta con una antena principal con pequeña amplitud y largo alcance (hasta 160 metros) lo que le permite actuar a distancias relativamente elevadas. También cuenta con otra antena de elevación de mayor apertura que permite detectar obstáculos a corta distancia, como peatones. Esta antena tiene la capacidad de medir la altura de los obstáculos detectados y decidir si el vehículo puede pasar por debajo o no.

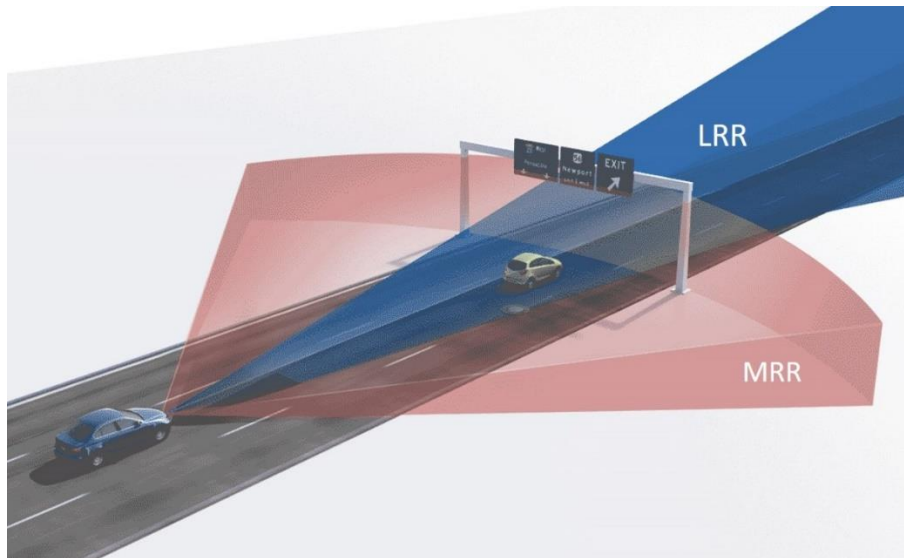


Fig. 3.14. Sistema de radares frontales, MRR Y LRR, de Bosch combinados. [15].

MRR trasero

La versión trasera del MRR permite obtener información de la parte trasera del vehículo y advertir de la presencia de otros vehículos en zonas sin visibilidad para el conductor. No es necesario tanto alcance como el MRR delantero ya que el vehículo si se encuentra en movimiento no existe tanta diferencia de velocidades con otros vehículos que se encuentren detrás. Se necesitan al menos dos de estos sensores traseros y colocados con un grado de inclinación de 45 grados respectivamente.

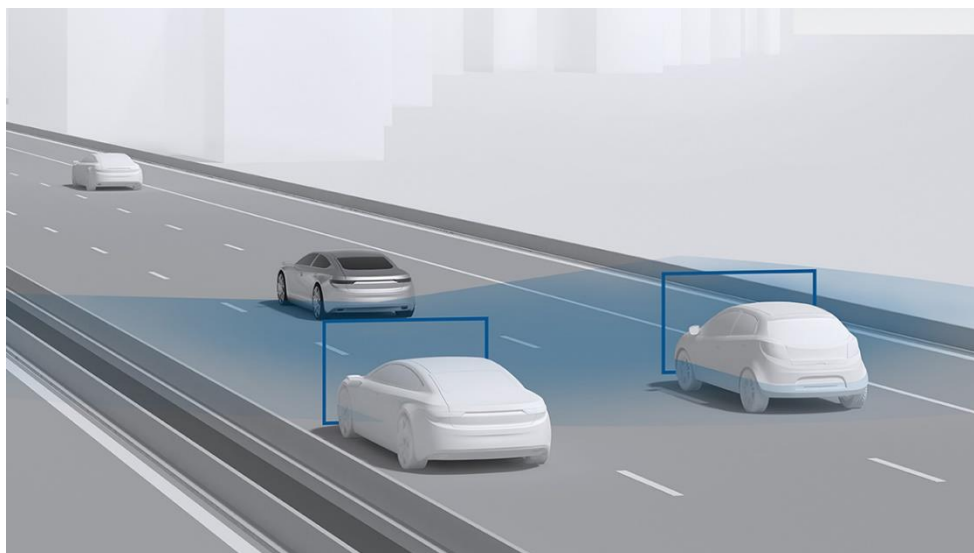





Fig. 3.15. MRR trasero de Bosch y detección de punto muerto con otros vehículos. [16].

TABLA 3.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE RADARES BOSCH.

	MRR delantero	MRR trasero	LRR4
 BOSCH			
Rango de frecuencia (GHz)	76-77		
Rango de detección (m)	0,36-160	0,36-80	0.36-250
Máxima cantidad de objetos detectados	32		24
Peso (g)	~190		~240
Apertura horizontal	45°	150°	30°
Campo de visión (Horizontal) Antena principal	±6° (160 m) ±9° (100 m) ±10° (60 m)	±5° (70m, dirección del haz principal) ±75° (Alcance restringido)	±6° (200 m) ±10° (100 m) ±15° (30 m) ±20° (5 m)
Antena de elevación	±25° (36 m) ±42° (12 m)		±4.5° (200 m)
Exactitud de medición			
Distancia	0.12 m	0.12 m	±0.12 m
Velocidad	0.11m/s	0.14m/s	0.11m/s
Ángulo	±0.3°	±0.8°	±(0.1-0.3)°
Tiempo de ciclo (ms)	~60		
Frecuencia de modulación	FMCW		
Dimensiones An x Al x P (mm)	70 x 60 x 30 (sin conectores) 70 x 82 x 30 (con conectores)		78 x 81 x 62 (sin conectores) 78 x 101 x 62 (con conectores)
Precio aproximado (€)	2.490	2.490	2.990
Fuente: Bosch Mobility and Solutions, driver assistance systems.			


3.3.1.2 Continental

Los sistemas RADAR de Continental son bastante avanzados y premium en su categoría. Permiten diversas aplicaciones muy similares a los sensores de Bosch y destacan por su robustez y calidad de construcción.

3.3.1.2.1. Largo alcance

Sistemas RADAR frontales con captación de largas distancias y a altas velocidades, lo que permite integrarlos en sistemas como ACC, FCW, EBA Y HAD. Permiten la captación precisa de objetos y la separación de los mismos sin necesidad de complementar con otros sensores.


TABLA 3.3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS RADARES CONTINENTAL LARGO ALCANCE.

 The Future in Motion	ARS 410	ARS 441	ARS 510
Rango de frecuencia (GHz)	76-77		
Peso (g)	~130	~295	~140
Campo de visión (Horizontal)	$\pm 4^\circ$ (170 m) $\pm 9^\circ$ (70 m) $\pm 45^\circ$ (40 m)	$\pm 9^\circ$ (250 m) $\pm 45^\circ$ (70 m) $\pm 75^\circ$ (20 m)	$\pm 4^\circ$ (200 m) $\pm 9^\circ$ (120 m) $\pm 45^\circ$ (40-70 m)
Tiempo de ciclo (ms)	~50	~60	~50
Dimensiones An x Al x P (mm)	94 x 69 x 20 (sin conectores)	137 x 91 x 31 (sin conectores)	83 x 69 x 22 (sin conectores)
Rango de temperatura	-40°C...+85°C		
Disipación de potencia (W)	4,5	8	4,5
Precio aproximado (€)	2.990	2.990	3.500
Fuente: Continental Automotive, advance driver assistance systems.			

3.3.1.2.2. Corto alcance

Sistemas de menor alcances pensados para su uso en la zona trasera, cuyas aplicaciones son desde aviso de otros vehículos en puntos sin visibilidad hasta ayudas de aparcamiento.

TABLA 3.4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS RADARES CONTINENTAL CORTO ALCANCE



 The Future in Motion	SRR510	SRR520	SRR320
Rango de frecuencia (GHz)	76-77 (opción 79 GHz)	76-77	24
Peso (g)	~58	~170	
Campo de visión (Horizontal)	$\pm 90^\circ$ (~70 m a 0°)	$\pm 90^\circ$ (~100 m a 0°)	
Tiempo de ciclo (ms)	~50		~40
Velocidad de medida ACC (precisión)	$\pm 0,1$ kph		$\pm 0,2$ kph
Dimensiones An x Al x P (mm)	56 x 53 x 13 (sin conectores)	83 x 69 x 22 (sin conectores)	
Rango de temperatura	-40°C...+85°C		
Disipación de potencia (W)	4,5		
Precio aproximado (€)	3.500	3.500	2.990
Fuente: Continental Automotive, advance driver assistance systems.			

3.3.1.3. Autoliv

Autoliv es otra compañía que ofrece sistemas RADAR de muy alto nivel y a la altura de sus competidores como Continental o Bosch. Desarrolla sistemas de gran precisión que permiten la advertencia de obstáculos, puntos ciegos, asistente de cambio de carril, apertura de puerta, ACC, entre otros. Actualmente Autoliv ofrece radares de 24 GHz de frecuencia, aunque está desarrollando sistemas de 77 GHz que ofrecen mayor precisión, rapidez de lectura y mayor ligereza.

De este modelo de 24 GHz se puede encargar en 3 modos distintos en función de las necesidades

TABLA 3.5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL RADAR AUTOLIV.

	<div>Autoliv 24 GHz</div> 		
	Modo operativo	BSD	LCA
Rango de frecuencia (GHz)	24 GHz		
Rango de detección (m)	0,5-14	4-80	2-60
Campo de visión (Horizontal)	±40°		
Campo de visión (vertical)	±11°		±10°
Precisión (cm)	±20	±50	
Ángulo de precisión	±5°	±2°	±5°
Rango de temperatura	-40°C...+80°C		
Velocidad de medida ACC (precisión)	±0,1 kph		±0,2 kph
Voltaje de suministro (V)	6-16		
Vida operativa	4 años		
Potencia límite salida (dBm)	+13	+15	
Precio aproximado (€)	3.000		
Fuente: Autoliv, radar systems.			

3.3.1.4. Delphi

La compañía AutonomouStuff se especializa en el sector del automóvil autónomo, desde desarrollo software hasta diseño de sensores como radares. Los productos RADAR que fabrica la empresa se conocen como Delphi, y tiene varios modelos:

Delphi MRR

Sensor multimodo con tecnología de estado sólido que permite gran fiabilidad. Este sensor de medio alcance ofrece unas prestaciones muy similares al MRR frontal de Bosch,

con la variación que éste tiene una apertura de 90° la cual es muy superior y funcional según en qué situaciones.

Delphi SRR2

Este módulo es peculiar por combinar aperturas con distintas orientaciones en el mismo dispositivo, detección trasera y a los laterales. Por lo que un mismo sistema ofrece información a gran distancia así como detectar posibles obstáculos cercanos en los laterales (CTA).

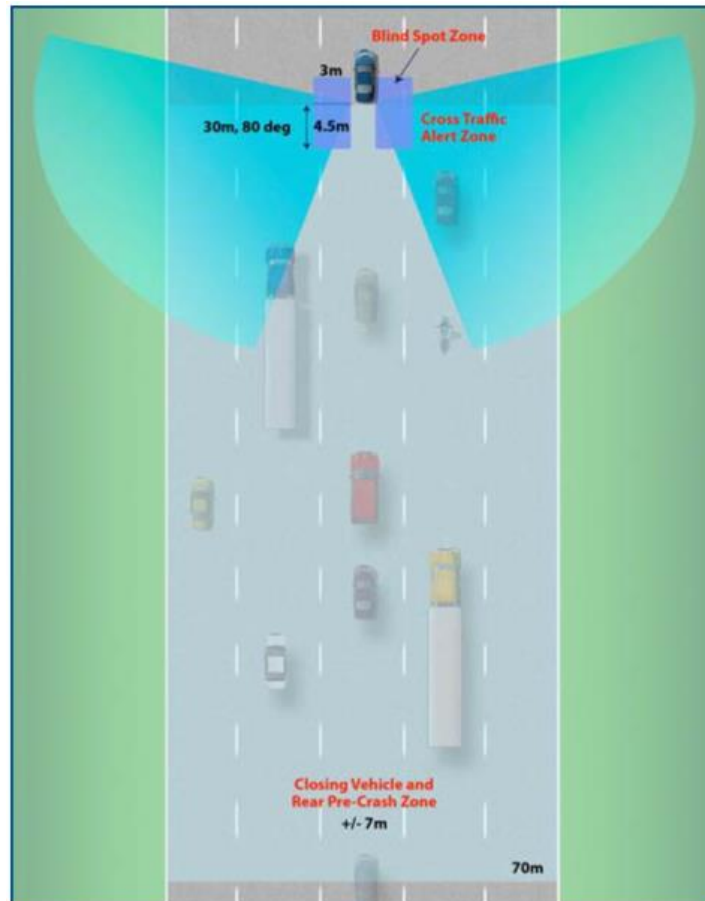





Fig. 3.16. Rango de acción lateral y trasero combinado del Delphi SRR2. [17].

TABLA 3.6. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE RADARES AUTONOMOUSUFF.

	Delphi MRR	Delphi SRR2
		
Rango de frecuencia (GHz)	76-77	
Rango de detección (m)	1-160	0,5-80
Rango de precisión (m)	$\pm 0,5$	
Mínimo rango de velocidad (m/s)	< -100	
Máximo rango de velocidad (m/s)	$> +20$	
Precisión rango de velocidad (m/s)	$\pm 0,3$	± 10
Apertura horizontal	$> 90^\circ$	$\pm 75^\circ$
Precisión apertura horizontal	$\pm 1^\circ$	
Campo de visión vertical	5°	
Máxima cantidad de objetos detectados	64	
Tiempo de ciclo (ms)	~ 30	
Rango de temperatura	$-40^\circ\text{C} \dots +85^\circ\text{C}$	
Peso (g)	330	380
Dimensiones An x Al x P (mm)	97 x 106 x 38,5 (con conectores)	115,4 x 73,8 x 25,3 (con conectores)
Precio aproximado (€)	2.490	3.490
Fuente: Autonomoustuff, Delphi radar		

Delphi ESR 2.5

El RADAR ESR de Delphi es un sensor que combina tecnología de medio alcance con largo alcance en el mismo dispositivo, ofreciendo ambos resultados simultáneamente.

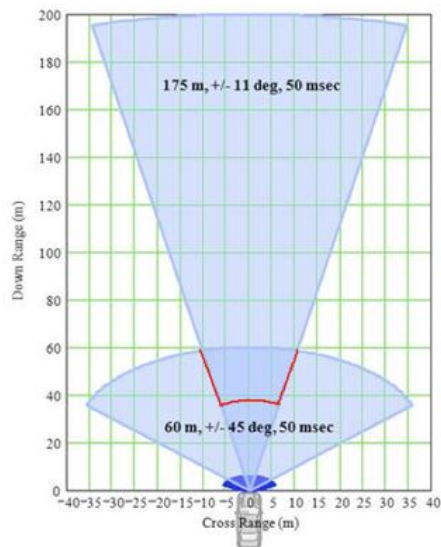


Fig. 3.17. Rango de actuación del Delphi ESR .5. Medio y largo alcance combinados. [18].

TABLA 3.7. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL RADAR DELPHI ESR 2.5.

		
	Requisitos de largo alcance	Requisitos de medio alcance
Rango de frecuencia (GHz)	76-77	
Cantidad de obstáculos detectados	64	
Rango de detección (m)	1-175 (> 10dB) 1-100 (> 0dB)	1-60 (> 10dB) 1-50 (> 0dB)
Rango de precisión (m)	±0,5	±0,25
Mínimo rango de velocidad (m/s)	-100	
Máximo rango de velocidad (m/s)	+40	
Precisión rango de velocidad (m/s)	±0,12	
Mínima velocidad relativa lateral (m/s)	-20	
Máxima velocidad relativa lateral (m/s)	+20	
Apertura horizontal	90°	20°
Precisión apertura horizontal	±0,3°	±0,1°
Campo de visión vertical	4,2°-4,75°	
Máxima cantidad de objetos detectados	64	
Dimensiones An x Al x P (mm)	173,7 x 90,2 x 49,2 (con conectores)	
Peso (g)	~575	
Tiempo de ciclo (ms)	~50	
Precio aproximado (€)	2.990	
Fuente: Autonomoustuff. Delphi radar		

3.3.2. LiDAR

Este tipo de sensor tiene una gran variedad de aplicaciones (automovilísticas, seguridad en ciudad, drones, industrias, detección de niveles de depósitos...) debido a todas las funcionalidades que ofrece: topografía, geología y gestión forestal, detección de velocidades y óptica adaptativa.

Para este proyecto en concreto se necesita un LiDAR con aplicación para vehículos en detección de obstáculos, por lo que se va a estudiar aquellos sensores que estén especializados en el sector automovilístico principalmente. Sin embargo, también se estudiarán aquellos que, por sus características como tamaño reducido o coste, sean potencialmente útiles para el desarrollo del proyecto.

En la siguiente figura aparece una muestra de todas las compañías en el sector LiDAR actualizado a fecha de abril de 2018.



Fig. 3.18. Actuales compañías LiDAR en el mercado vs. Investigación y desarrollo. [19].

Existen una serie de compañías activas en el mercado como Valeo, Velodyne y LeddarTech, y que actualmente tienen sus productos a la venta. También existen otras compañías de interés que están desarrollando versiones de prueba y prototipos como Continental, Aeye, Quanergy y Luminar. Sin embargo, debido a que no tienen sus productos destinados a la venta directa, sólo se analizarán las compañías actualmente activas en el mercado.

3.3.2.1. Velodyne

Actualmente Velodyne es la compañía líder en productos LiDAR especializados en el sector automovilístico. Ofrece gran variedad de productos de muy alta calidad y que ofrecen resultados muy precisos. De la gran variedad de productos que disponen, los más relevantes para el proyecto son:




VLP-16

El Velodyne Puck o VLP cuenta con una capacidad de detección de hasta 16 obstáculos. Su campo de visión (FOV) horizontal es de 360° y el vertical de 30°. Su alcance es bastante elevado para sus reducidas dimensiones y bajo consumo y ofrece resultados precisos.

HDL-32E

Este sensor de dimensiones compactas y gran rendimiento es capaz de captar hasta 32 objetos simultáneamente, ofrece un rango de visión horizontal de 360 grados y capta superficies con gran definición

TABLA 3.8. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE SISTEMAS LIDAR VELODYNE.

	VLP-16	HDL-32E
		
Clase del Laser	1 (No dañina al ojo)	
Longitud de onda (nm)	903	
Objetos detectados	16	32
FOV horizontal	Giratorio 360°	
FOV vertical	±15°	-30° hasta +10°
Alcance máximo (m)	100	80-100
Puntos por segundo (pps)	300.000	700.000
Precisión (cm)	<3	<2
Temperatura operativa	-10°C...+60°C	
Peso (g)	~830	~1300
Dimensiones Al x Ø (mm)	144,2 x 85.3	72 x 103
Precio aproximado (€)	7.000	26.500
Fuente: Velodynelidar		

3.3.2.2. LeddarTech

LeddarTech es una compañía dedicada a la tecnología LiDAR aplicada a coches autónomos, seguridad vial y aeronaves. Sus productos más destacados por sus características, son:

Leddar One

Módulo de detección de un único elemento, de bajo costo y eficiente. Reducidas dimensiones y peso para su incorporación en todo tipo de sistemas incluidas las aeronaves tipo UAV.

LeddarVu - 8

Sensor LiDAR capaz de detectar hasta 8 obstáculos simultáneamente. Su diseño modular permite configurarlo con 3 rangos de apertura según los requerimientos en concreto:

amplio, medio y estrecho. Según la configuración, el campo de visión, el alcance, las dimensiones y el peso varían como se muestra en la siguiente tabla:

CONFIGURATIONS		Vu8 - Narrow FOV		Vu8 - Medium FOV		Vu8 - Wide FOV	
Horizontal FOV		20°	20°	48°	48°	100°	100°
Vertical FOV		0.3°	3°	0.3°	3°	0.3°	3°
Dimensions (H x W x D)		70 mm x 35.2 mm x 67.5 mm		70 mm x 35.2 mm x 45.8 mm		73 mm x 40 mm x 65 mm	
Weight (for SPI carrier model)		110.3 g		107.6 g		128.5 g	
Range ⁴	Retro-Reflector ¹	185 m	121 m	118 m	85 m	61 m	34 m
	White Target ²	60 m	34 m	31 m	19 m	12 m	9 m
	Gray Target ³	38 m	22 m	18 m	13 m	7 m	6 m

Fig. 3.19. Características según configuración del leddarvu-8. [20].

Estos tres modos permiten captación de campos cercanos como el modo amplio, pero también captación de campos más lejanos como el modo estrecho, lo cual supone conexión de varios módulos en *array* (uno al lado del otro) para una completa cobertura.




Leddar M16

Sistema LiDAR con capacidad de detección de hasta 16 elementos simultáneos. Este módulo se configura con dos tecnologías laser: LASER y LED. Las posibilidades, según el campo de visión, son numerosas, tal como se recoge en la siguiente figura:

	Horizontal FOV (°)	Vertical FOV (°)	Dimensions ⁴ (mm)	Weight (g)	Range (m)		
M16-LSR					Retro-reflector ¹	White 90% ²	White 18% ³
M16R-75J0003	19	3	71 x 64 x 66	255	110	31	18
M16R-75J0002	36	0.2	64 x 64 x 66	170	146	37	20
M16R-75J0007	48	0.3	64 x 64 x 66	165	105	27	16
M16R-75J0008	48	3	64 x 64 x 66	165	60	16	10
M16R-75J0001	48	5.5	64 x 64 x 66	165	60	16	10
*Available December, 2017	16	0.3	-	-	-	-	-
*Available December, 2017	16	2.25	-	-	-	-	-
*Available December, 2017	95	3	-	-	-	-	-
*Available December, 2017	95	0.3	-	-	-	-	-
M16-LED							
M16D-75B0006	9	1.5	87 x 104 x 66	295	100	35	25
M16D-75B0007	18	3	71 x 104 x 66	255	93	24	15
M16D-75B0009	24	4	60 x 104 x 66	205	85	25	16
M16D-75B0010	36	6	52 x 104 x 66	200	62	17	12
M16D-75B0005	48	8	47 x 104 x 66	175	55	16	10
M16D-75B0008	100	8	63x 104 x 84	210	25	6	3

Fig. 3.20. CARACTERÍSTICAS SEGÚN CONFIGURACIÓN DEL LEDDAR M16. [21].

TABLA 3.9. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE SISTEMAS LIDAR LEDDARTECH.

LeddarTech®	Leddar One	LeddarVu - 8	Leddar M16
			
Rango de detección (m)	0-40	6-185	3-110
Máxima cantidad de objetos detectados	1	8	16
Longitud de onda (nm)		905	905 (LSR) 940 (LED)
Peso (g)	~14	~110	165 hasta 295
FOV horizontal	3°	20° (Wide) 48° (Medium) 100° (Narrow)	9° hasta 100° (Según tecnología y configuración)
FOV vertical	3°	0,3° hasta 3°	0,2° hasta 8° (según tecnología y configuración)
Temperatura de trabajo	-45°C...+85°C		
Precisión (cm)	5		
Velocidad de actualización de datos (Hz)	Hasta 140	Hasta 100	
Dimensiones P x Ø (mm) y Al x An x P (mm)	21 x 50,8 (sin conectores) 30,6 x 50,8 (con conectores)	70 x 35,2 x 67,5 (Wide) 70 x 35,2 x 45,8 (Medium) 73 x 40 x 65 (Narrow)	Variedad de dimensiones según la tecnología láser y la configuración establecida
Consumo de energía (W)	1,3	2	4
Precio de venta (€)	130	750	930
Fuente: Leddar tech, lidar			

3.3.2.3. Ouster

Compañía recién llegada al mercado cuya especialización es el escaneo de mapas 3D mediante la tecnología LiDAR. Ofrece diversos productos capaces de captar desde 16, hasta 128 obstáculos. De todos estos productos, el más relevante por las propiedades que ofrece, es el Ouster OS-1 de 16 canales.

TABLA 3.10. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SISTEMA LIDAR OUSTER.

	<p>OS-1 16</p> 
Rango de detección (m)	Hasta 120
Precisión (cm)	±1,5
Máxima cantidad de objetos detectados	16
Longitud de onda (nm)	850
FOV horizontal	360°
FOV vertical	±16,6°
Dimensiones Al x Ø (mm)	73 x 85 (sin accesorios)
Temperatura operativa	-20°C...+50°C
Peso (g)	380
Peso con accesorios (g)	1110
Precio de venta (€)	3100
Fuente: Ouster	

3.3.2.4. Valeo

Empresa tecnológica dedicada a desarrollar sistemas y productos de innovación en el sector automotriz. Valeo ha desarrollado un sistema LiDAR denominado Scala, el cual ofrece un rendimiento considerable al precio de venta.



TABLA 3.11. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SISTEMA LIDAR VALEO.

	<p>Scala</p> 
Máxima cantidad de objetos detectados	4
Rango máximo (m)	80-100
Longitud de onda (nm)	905
FOV horizontal / vertical	145° / 3,2°
Temperatura operativa	-40°C...+85°C
Precisión (cm)	<10
Resolución angular horizontal / vertical	0,25° / 0,8°
Dimensiones Al x An x P (mm)	108 x 102 x 60 (sin conectores) 133 x 102 x 70 (con conectores)
Consumo energético (W)	7
Precio aproximado (€)	530
Fuente: Valeo	

3.3.2.5. GOEMBED

Compañía dedicada al desarrollo y producción de placas electrónicas. Tiene su propio sensor LiDAR en su tercera versión, Lite V3, y destaca por su reducido precio y características considerables.

TABLA 3.12. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SISTEMA LIDAR GOEMBED.

	Lite V3 
Rango de detección (m)	0-40
Máxima cantidad de objetos detectados	1
Longitud de onda (nm)	905
FOV horizontal	4°
FOV vertical	2°
Apertura óptica (mm)	12,5
Precisión (cm)	±2,5 (<5 m) ±10(>5 m)
Dimensiones Al x An x P (mm)	40 x 48 x 20
Temperatura operativa	-20°C...+60°C
Peso (g)	22
Consumo energético (W)	1,3
Precio aproximado (€)	130
Fuente: Goembed, embedded module	

3.4. Selección del sensor

Después de un análisis intensivo de mercado, se comprobó que los sensores de tipo RADAR tenían un precio aproximado de 3000€, compitiendo la mayoría de ellos al mismo nivel de gama de producto. Estos ofrecían características muy similares y cuyas diferencias eran mínimas, como mayor o menor apertura, longitud de alcance o cantidad de obstáculos detectados, entre otras.

La parte positiva de estos sensores era que estaban muy optimizados y adaptados para su aplicación en vehículos, por lo que su implementación y obtención de resultados iban a ser muy eficaces y precisos.

De todos los sensores de RADAR analizados, se consideró que el de mejor relación calidad/precio era el Delphi ESR 2.5 debido a su capacidad de combinar detección de rango medio y de largo alcance simultáneamente, ofreciendo una mayor cobertura que los demás en el mismo dispositivo.

Por otro lado, a diferencia de los sensores tipo RADAR, en los sensores tipo LiDAR existía una mayor variedad de gamas de producto. Desde la gama más alta, como los

Velodyne o el Ouster, hasta las gamas más baja como el Lidar Lite V3 de GOEMBED o el Leddar One.

En este caso se observó que los sensores LiDAR de alto nivel eran mucho más caros que los de RADAR, superando algunos los 9000€, mientras que los de gama baja tenían un costo muy inferior llegando alguno por debajo de los 100€.

También es cierto que, frente a tanta variedad de producto, muchos de estos sensores no estaban tan enfocados al sector automovilístico como los de RADAR. Para esta tecnología los fabricantes los especializan en aeronaves, especialmente los drones o UAV, que al no ser tripulados deben ser capaces de evitar obstáculos a su alrededor de forma autónoma.

Independientemente de la aplicación a la que estaban destinados, los sensores LiDAR ofrecían resultados muy similares a los de RADAR, incluidos los de gama baja que tenían un precio mucho más económico en comparación.

Es por esto que, para la realización de este proyecto, se optó por un sensor tipo LIDAR, que proporcionaría los resultados deseados para la investigación.

En concreto se escogió el Leddar One de Leddartech™ debido a su precio bastante económico y dado que no era necesario más que un único punto de detección: el paso de un vehículo por el carril más cercano al sensor.

Las ventajas del LiDAR frente al RADAR son varias:

- Algunos modelos más económicos y rendimiento similar al de un RADAR.
- Mayor facilidad de transportar y manejar.
- Menores costos de mantenimiento.
- No sufre interferencias de otros sensores, por lo que no es necesario un procesamiento de señal para reducir dichas interferencias.
- Inmunidad al ruido. Presenta mayor rendimiento en condiciones de mucho tráfico.
- Capacidad de funcionamiento ante luz ambiental fuerte y luz solar directa
- Mayor rapidez en obtención de datos (0,3 segundos en condiciones normales).
- Al igual que los sensores RADAR, la tecnología LiDAR tiene capacidad de funcionamiento en condiciones climatológicas adversas (lluvia, niebla...) y también de noche.
- El haz de láser es mucho más estrecho y diverge menos, por tanto, es ideal para poder concentrar el haz en una zona muy concreta. Permite determinar únicamente la velocidad del vehículo que circula en el carril más cercano, eludiendo al resto de vehículos que circulan en otros carriles o condiciones de tráfico intenso.

Desventajas:

La única limitación del láser LiDAR es que siempre tiene que estar estático. El RADAR se puede emplear en movimiento, pero el láser LiDAR no se puede mover mientras realiza la medición.

4. INTRODUCCIÓN AL LIDAR Y CONOCIMIENTOS AVANZADOS

La adquisición de conocimientos específicos sobre la tecnología LiDAR se ha basado en el libro electrónico: *Lidar, range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*. [22].

4.1. Historia

El LiDAR se introdujo a principios de 1930 cuando se pretendía medir la densidad del aire en la atmósfera superior. Esta información se obtenía mediante la dispersión de los haces de luz con su interacción en la estructura molecular del aire.

En 1938 se usó por primera vez esta tecnología para medir distancias con respecto a las nubes. Los avances tecnológicos permitieron diseñar sistemas compuestos por transmisor y receptor calculando la distancia en base al tiempo que tardaba el haz de luz en llegar.

El acrónimo LiDAR fue introducido en 1953 por Middleton y Spilhaus quienes documentaron sus investigaciones en: *Meteorological instruments*.

En 1960 se inventó la tecnología LASER, lo que permitió desarrollar sistemas LiDAR más potentes y sofisticados. Este desarrollo, seguido de los avances de la tecnología electrónica y óptica supuso grandes procesos en la obtención de datos.

Con el paso del tiempo, se fueron perfeccionando los sistemas LiDAR con filtros ópticos de alta transmisividad, detectores eficientes, sistemas de captación de gran amplitud de magnitudes de señales y fuertes pendientes espectrales.

Todos estos avances permiten que en la actualidad la tecnología LiDAR obtenga información muy fiable y precisa, y que sea una opción muy conveniente para diversas prácticas.

4.2. Principios físicos y características de la tecnología LiDAR

La tecnología LiDAR se basa en la propagación de una onda electromagnética, la luz, a lo largo de un medio elástico. El principio fundamental de la emisión de la luz a través de un entorno a lo largo de una distancia x se basa en la siguiente fórmula:

$$P(x) = KG(x)\beta(x)T(x) \quad (4.1)$$

Siendo P la potencia con la que se emite, K y G términos que describen la precisión y capacidad de medición del sistema LiDAR, β el coeficiente de retrodispersión a distancia (que se refiere a la capacidad de reflexión de las partículas en la atmósfera) y T es el elemento de transmisión que supone la cantidad de luz emitida en relación a la pérdida en su recorrido.

Sin embargo, este proceso no se produce en condiciones ideales y la luz posee ciertas propiedades que pueden afectar al funcionamiento de esta tecnología. Por tanto, es necesario estudiar y conocer todos los fenómenos físicos considerables.

4.2.1. Frecuencia de emisión de pulsos

Un sistema LiDAR depende de la emisión de pulsos constantes que le permiten detectar superficies y objetos, así como información de ellos.

Es significativo conocer la capacidad de emisión de pulsos por unidad de tiempo, actualmente superior a los 150 kHz, lo cual ofrecerá información más detallada sobre la ubicación o velocidad relativa con los obstáculos detectados.

4.2.2. Dispersión o divergencia del rayo

La proyección del haz no es rectilínea, si no que existe una divergencia en su propagación a lo largo del espacio. Esta divergencia es tanto vertical como horizontal y describe una circunferencia formando un cono de luz. Por tanto, la dispersión es constante en cualquier dirección del plano perpendicular a la dirección de la trayectoria.

En la siguiente figura se muestra una representación de la dispersión láser, donde γ es el ángulo de divergencia, D_0 el diámetro de apertura del emisor y D el diámetro variable de la región óptica correspondiente al plano generado a lo largo de la distancia x .

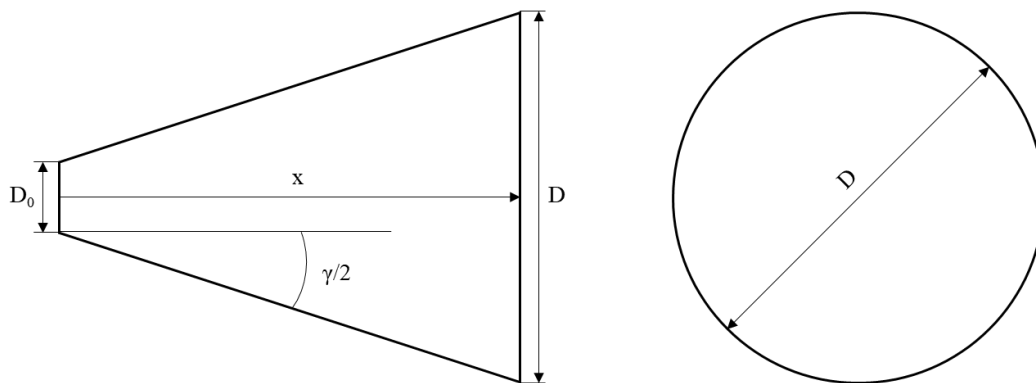


Fig. 4.21. Apertura del haz de luz provocada por la divergencia de la transmisión de la luz.

El diámetro de región óptica tiene una relación directa con la distancia y la divergencia, de tal forma que se podría obtener el valor del diámetro en función de la distancia con la siguiente fórmula:

$$D(x)^2 = D_0^2 + x^2\gamma^2 \quad (4.2)$$

Aunque el ángulo de divergencia puede llegar a tomar valores muy pequeños, a razón de miliradianes, puede llegar a tener gran relevancia en largas distancias.

En función de la aplicación operativa del LiDAR, se utilizará una mayor o menor dispersión. La dispersión se podría adaptar según los requisitos y simplemente sería necesario conocer qué diámetro de región óptica se quiere obtener en una determinada distancia:

$$\gamma = 2 \arctan\left(\frac{D - D_0}{2x}\right) \quad (4.3)$$

Por otro lado, el ángulo de divergencia es directamente proporcional a la longitud de onda:

$$\gamma \geq 2,44 \frac{\lambda}{D} \quad (4.4)$$

Y la longitud de onda depende de la frecuencia de la señal, ya que es el resultado de la relación de la velocidad de la luz con la frecuencia:

$$\lambda = \frac{c}{F} \quad (4.5)$$

Por tanto, si se deseara variar el ángulo de divergencia se puede utilizar una onda con una frecuencia específica. El infrarrojo al ser la onda de menor frecuencia, es el que tiene mayor longitud de onda y, por tanto, mayor dispersión. Por otro lado, el ultravioleta es el que tiene mayor frecuencia, lo que se traduce en menor longitud de onda y dispersión.

Otras opciones que ayudan a variar el ángulo de incidencia sería el uso de lentes ópticas o espejos inclinados que producen cambios bruscos en la apertura del haz de luz. El cálculo de la divergencia para el uso de lentes ópticas viene a ser:

$$\lambda = \frac{D_0}{f} \quad (4.6)$$

donde f es la distancia focal de la lente.

4.2.3. Ángulo de incidencia

En ocasiones, debido a parámetros funcionales o de diseño, el sensor LiDAR no se puede orientar perpendicularmente a la superficie a detectar, si no que existe una pequeña inclinación del plano del haz de luz con dicha superficie.

Es necesario conocer la inclinación del sensor para aplicar la conversión necesaria debido a que todos los rayos del haz no inciden a la vez en la superficie, consiguiendo reflexiones no proporcionales en cada punto de contacto.

En la siguiente figura se muestra una representación teórica del resultado en función de la inclinación θ , siendo el punto 1 el más cercano y el 2 el más lejano.

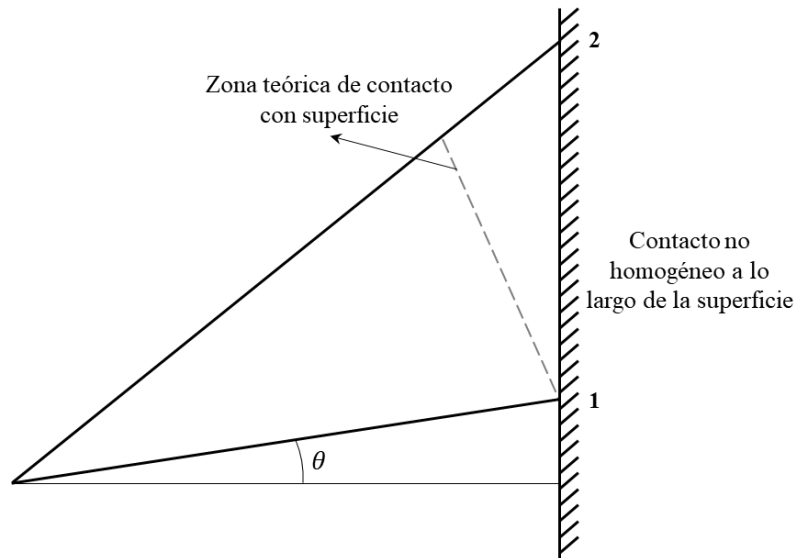


Fig. 4.22. Contacto del haz de luz sobre la superficie con una inclinación θ .

A efectos prácticos el punto 1 llegará antes al receptor por estar a menor distancia y el punto 2 será el último.

Es por esto que hay que tener en cuenta esta pequeña inclinación ya que puede dar resultados distintos a los reales.

4.2.4. Intensidad (irradiancia)

La intensidad de cualquier radiación electromagnética supone la cantidad de energía que incide sobre una superficie.

Se puede cuantificar con la siguiente fórmula como la relación de la potencia incidente con la superficie irradiada:

$$I = \frac{P_{inc}}{A} \quad (4.7)$$

El valor de la intensidad en la tecnología LiDAR se traduce en la precisión de escaneo de superficies, ya que, si se reduce el área de incidencia, se concentra el haz de luz y se consigue mayor resolución. Por lo que, para la misma potencia, a mayor intensidad se obtiene mayor precisión.

La intensidad también se refiere a la potencia que consume el sistema LiDAR. Es importante conseguir reducir el consumo y evitar posibles calentamientos. En este caso, para la misma superficie irradiada, a menor intensidad, menor potencia y mayor eficiencia energética.

Por tanto, es interesante conseguir un equilibrio en el valor de intensidad que permita un área de escaneo de suficiente calidad y un consumo relativamente eficiente.

4.2.5. Reflectividad y reflectancia

La reflectividad se basa en la cualidad que tienen los objetos gruesos de reflejar una fracción de luz incidente en sentido opuesto. La reflectancia se refiere a la cantidad de energía reflejada en relación a la incidente.

Es decir, ambos valores son dos formas de cuantificar la capacidad de un objeto en reflejar el haz de luz y dependen del material de la superficie. En la siguiente tabla se muestra un ejemplo de la reflectividad de varios materiales en tanto por ciento para una onda de frecuencia alta o luz infrarroja.

TABLA 4.13. REFLECTIVIDAD (%) DE ALGUNOS MATERIALES.

Material	Reflectividad (%) (para luz infrarroja)
Acero inoxidable pulido	400
Aluminio sin tratar	140
Nieve	80-90
Mampostería blanca	85
Papel	80
Arcilla caliza	70
Arena de playa y desierto	50
Botella de plástico	40
Madera sin tratamiento	25
Hormigón liso	24
Asfalto	17
Lava	8
Neopreno	4
Caucho	2

El sistema LiDAR debe estar capacitado para recibir el haz de luz devuelto desde el material más reflectante hasta el que menos, así podrá identificar todos los objetos incluso podrá distinguir el tipo de material por la cantidad de luz reflejada.

4.3. Configuración de un sistema LiDAR básico

El sistema LiDAR puede operar de dos formas: como sistema pasivo en el que recibe información directa de los objetos aprovechando la energía lumínica que emiten; como sistema activo en el que es el sensor el que emite la energía y después la recibe.

Sin embargo, para el presente proyecto se ha estudiado el sistema LiDAR activo, ya que permite emitir los pulsos de forma controlada hacia cualquier objeto sin depender que éste los emita.

Para la obtención de información, todo sensor LiDAR depende de 4 elementos esenciales con sus respectivas operaciones: un transmisor que emite la señal inicial, un medio con el que interactúa, un receptor que capte la vuelta de la señal y un conversor que procese la señal obtenida en datos útiles.



Fig. 4.23. Elementos de funcionamiento en un sistema LiDAR convencional.

Además, el sistema LiDAR se puede dividir en 2 grupos o módulos: el transmisor y el receptor. Aunque estos dos módulos sean distintos y sus funciones sean las opuestas, se comunican mutuamente para saber el estado de cada uno. En la siguiente figura se muestra una configuración básica de un sistema LiDAR:

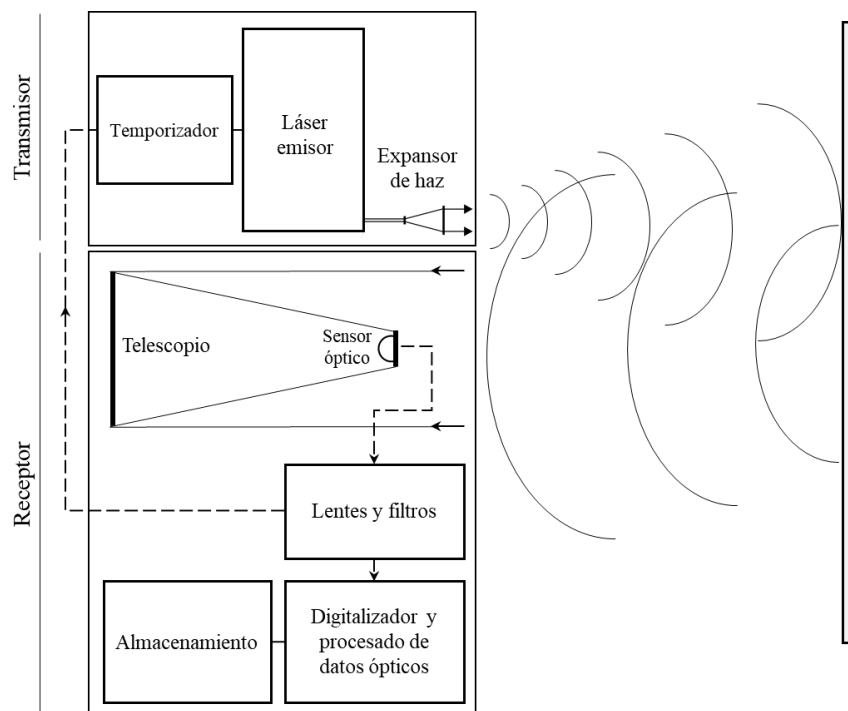


Fig. 4.24. Composición interna de una configuración LiDAR básica.

4.3.1. Módulo transmisor

En el módulo transmisor se encuentra el emisor óptico compuesto por diodos LED o diodos LASER. Los primeros ofrecen una mayor longitud de onda, por tanto, mayor divergencia que los diodos láser.

El emisor óptico suele venir acompañado de un expansor de haz. Este expansor le permite reducir la dispersión del haz antes de emitirlo al exterior.

En el módulo transmisor también existe un temporizador que le permite al emisor emitir el siguiente pulso. Este temporizador está directamente conectado al módulo receptor, lo que permite una comunicación recíproca entre ambos módulos.

4.3.2. Módulo receptor

En el módulo receptor se pueden apreciar los siguientes elementos:

Uno o varios telescopios y/o espejos: Debido a que la luz se propaga con cierta divergencia, cuando ésta llega al receptor, abarca más superficie con la que se emitió. Por lo que se usan telescopios cuya función es converger el haz de luz hacia un punto concreto: el sensor óptico.

Sensor óptico: este sensor, conocido como fotodetector, capta los fotones del haz de luz reflejado que incide sobre el sistema. Puede transmitir la señal óptica mediante pulsos eléctricos, o la señal misma a través de fibra óptica hasta un conversor de pulso.

Lentes y filtros: en caso de que el fotodetector transmita el pulso luminoso a través de fibra óptica, éste podría necesitar pasar por una serie de lentes y filtros para adaptar la señal y proteger a los componentes posteriores.

En esta etapa, existe una conexión directa al temporizador, el cual recibe una indicación de que el receptor ha recibido la señal correctamente. Esto le permite al temporizador reiniciar el ciclo para que el emisor vuelva a enviar un nuevo pulso.

Digitalizador y procesamiento de señal: este elemento recopila la información proveniente del fotodetector y transforma la señal recibida en información legible o útil para su interpretación posterior.

El digitalizador puede seleccionar longitudes de onda específicas o estados de polarización de ondas electromagnéticas transversales. Estos componentes se tratan de chips de alta potencia que deben operar a grandes frecuencias de reloj para procesar la señal lo más rápido y eficientemente posible.

Almacenamiento: Una vez se ha recibido y procesado la señal, se guarda la información en un chip de memoria. Este chip irá guardando una nube de puntos que determinarán la geometría de los objetos o superficies detectadas. Pueden existir sistemas sin unidad de almacenamiento donde la información recopilada se exporta a otros equipos o sistemas que almacenan esta información.

4.4. Normativa vigente

Los sistemas LiDAR se basan en la emisión rayos de luz láser, y esta tecnología está fuertemente normalizada para su fabricación y comercialización tanto a nivel nacional como global.

Nivel nacional

La norma aplicable a la tecnología láser en España es la UNE-EN ISO 11151: *Láseres y equipos asociados a los láseres*. [23].

En concreto se aplica la primera parte de la norma que se refiere a aquellos componentes que operan en todos los intervalos espectrales, desde los infrarrojos hasta los ultravioleta UV (desde 170 nm hasta los 2100 nm).

El sistema LiDAR a desarrollar debe ser conforme según los requerimientos especificados en la norma. Estos requisitos son:

- Normalización de las especificaciones técnicas (componentes empleados, sus materiales y composición).
- Estandarización de dimensiones y tolerancias.
- Seguimiento de un patrón para los pedidos.

Existen algunos sistemas laser que utilizan recubrimientos especiales para producir un grado de reflectancia, estos recubrimientos no se recogen en esta norma.

Para el tipo de óptica utilizada en los sistemas láser existe otra norma, la ISO 9211:2012, que se refiere a Óptica e instrumentos ópticos. Recubrimientos ópticos. [24].

Esta norma no especifica los métodos de tratamiento y aplicación de recubrimientos ópticos, si no los procedimientos de ensayo y medición de las ópticas con su recubrimiento fijado.

Nivel global

Según el organismo de normalización internacional de componentes eléctricos y electrónicos, el IEC (*International Electrotechnical Commission*), la norma aplicable a la seguridad emitida por un láser con una longitud de onda desde los 180 nm a 1 mm es la IEC 60825-1:2014.

Como un sistema LiDAR opera en este rango de frecuencia, el sistema debe cumplir con esta norma para su comercialización a nivel global.

Los requisitos de la norma son varios, entre los que destacan los siguientes:

- Uso de láser de clase 1, la cual no es dañina para el ojo humano.
- Información suficiente por parte del fabricante, etiquetas e instrucciones, para el uso del sistema láser, precauciones a considerar y peligros de la exposición a la radiación emitida.
- Sistemas de control para reducir la radiación generada.

5. DISEÑO

La estructura del sistema se basa en los siguientes elementos:

- 4 sensores de fuerza³: estos sensores van colocados uno en cada asiento del vehículo (obviando el quinto del asiento central ya que si un individuo que ocupa ese asiento quisiera salir debería pasar primero por uno de los laterales y activar su sensor respectivo). La idea de estos sensores es identificar si hay alguna persona sentada y mostrar al sistema qué puerta debe bloquear.
- Sensor de velocidad: este sensor está implementado en todos los vehículos de serie, debido a que se usa para determinar la velocidad instantánea del vehículo. Va a ser necesario aprovechar este sensor para detectar cuándo el vehículo está parado y poder conmutar el modo de programa.
- 2 sensores LiDAR: necesarios uno a cada lado del vehículo que captarán la información desde el exterior para después ser procesada y combinarse con el resto de sensores.

Todos estos elementos equivalen a un sistema conjunto para ambos laterales del vehículo. Sin embargo, sólo se ha desarrollado el sistema de un lateral, debido a que con el mismo resultado se puede extrapolar para el otro lateral ya que funcionarían independientemente.

5.1. Componentes

Para la realización del proyecto se ha escogido Arduino™, usando hardware de electrónica básica adaptada a este proyecto y su software correspondiente. Los componentes usados son:

- Placa Arduino MEGA 2560 Rev3
- Sensor LiDAR Leddar One de LeddarTech™
- 2 sensores de fuerza FSR
- Pantalla LCD 20X4 (mostrará los outputs obtenidos, estos outputs se trasladarán al sistema de bloqueo de la puerta)
- Altavoz piezoeléctrico o *buzzer*
- Led de bajo consumo

5.1.1. Placa Arduino MEGA 2560 Rev3

El programa seleccionado para la programación del sensor fue Arduino debido a la gran variedad de posibilidades y fácil manejo del mismo. Por tanto, el chip integrado que compile el programa era de Arduino, en este caso la serie Mega 2560 R3.

³ Actualmente la mayoría de vehículos utilizan sensores de fuerza para controlar que cada ocupante tenga el cinturón abrochado, por lo que en la realidad se podrían aprovechar estos sensores ya existentes para el sistema LiDAR.

El motivo principal de la elección de esta placa era la memoria, ya que con sus 256 kB permite cargar librerías complejas y funcionar con mayor velocidad de proceso, además de dejar más espacio disponible para el código.

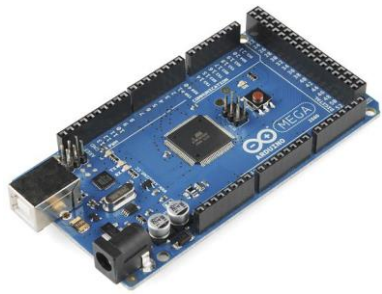
Teniendo en cuenta la memoria, también se pensó en la obtención de la tarjeta Arduino DUE con 512 KB que le otorgaba una capacidad de memoria y velocidad superior. Sin embargo, se descartó esta opción ya que todos sus pines E/S trabajaban a 3,3V, y resultaba más complicado encontrar sensores y componentes que funcionaran con esta tensión menos estándar que los 5V.

Otro motivo de la elección de la placa Mega era la conectividad, ya que ofrece una gran cantidad de pines digitales y analógicos, además de varios puertos serie.

Cuenta con 54 pines digitales de entrada o salida (de los cuales 15 de ellos pueden ser usados como salidas de potencia), 16 entradas analógicas, 4 conexiones UART o puertos serie RX/TX.

Así mismo, esta placa monta un reloj de oscilación de 16 MHz, un cabezal ICSP, conexión USB, conexión a alimentación y un botón de reinicio.

TABLA 5.14. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ARDUINO MEGA REV3.

Microprocesador	ATmega 2560	
Tensión de funcionamiento (V)	5	
Voltaje de entrada recomendado (V)	7-12	
Voltaje de entrada límite (V)	6-20	
Pines digitales de E / S	54	
Pines de entrada analógicos	16	
Memoria Flash (KB)	256	
Velocidad de reloj (MHz)	16	
Dimensiones An x Al x P (mm)	53.3 x 10 x 101.52	
Peso (g)	37	
Fuente: Arduino store		

5.1.2. Sensor Leddar One

El sensor elegido ha sido el Leddar One de tipo LiDAR debido a sus ventajas frente a la tecnología RADAR y por su alta relación calidad/precio; todas estas conclusiones se han especificado con mayor detalle en el apartado 4.4. SELECCIÓN DEL SENSOR.

El Leddar One es un sensor LiDAR de un único elemento que está diseñado para detectar objetos y medir distancias precisas de hasta 40 metros. Estos resultados los obtiene gracias a la reflexión de la iluminación led infrarroja con los objetos y posterior procesamiento de señales digitales con el chip integrado.

Este sensor puede ser usado en distintas aplicaciones como detección de nivel, detección de vehículos y advertencia de altura, medición de proximidad y parametrización de altura para drones.

Este módulo destaca por sus dimensiones compactas, su reducido peso y consumo energético eficiente, lo cual le da gran versatilidad y flexibilidad en su utilización en distintas aplicaciones.

Hay que destacar que este sensor venía con dos versiones de interfaz: la versión UART y la RS-485. Se escogió la UART por utilizar una comunicación serial mucho más útil para su utilización en Arduino.

TABLA 5.15. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS LEDDAR ONE.

Módulo	UART 3,3V	
Rango de detección (m)	0-40	
Máxima cantidad de objetos detectados	1	
Peso (g)	~14	
Apertura horizontal	3°	
Temperatura de trabajo (°C)	-45 hasta +85	
Precisión (cm)	5	
Velocidad de actualización de datos (Hz)	Hasta 140	
Dimensiones P x Ø (mm)	21 x 50,8 (sin conectores) 30,6 x 50,8 (con conectores)	
Consumo de energía (W)	1,3	
Fuente: Leddartech, lidar		

5.1.3. Sensor FSR

Para la detección del ocupante dentro del vehículo se ha optado por sensores de detección de fuerza de zona única de Interlink Electronics™, concretamente la serie FSR 400 (*Force Sensing Resistor*).

Estos sensores muestran la disminución de la resistencia con el aumento de la fuerza aplicada a la superficie del sensor, la cual está diseñada para su uso táctil en dispositivos electrónicos robóticos o sistemas médicos. Por tanto, estos resistores funcionan como resistencias variables que dejarán pasar una cantidad de voltaje según la presión que se aplique.

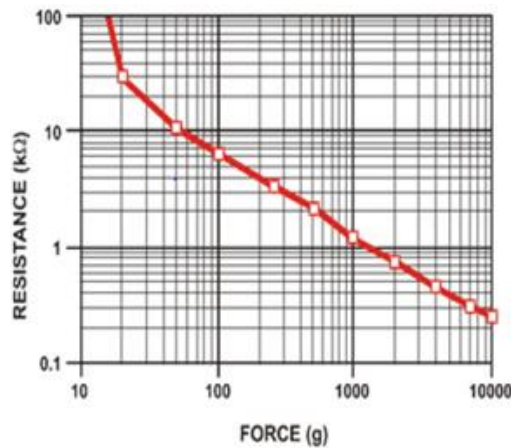



Fig. 5.25. Gráfica de la variación de resistencia en función de la fuerza. [25].

Aun así, para este proyecto en concreto funcionan como interruptores que, cuando la presión ejercida supere la mínima establecida, el sistema activa el circuito.

Aunque estos resistores no son capaces de soportar elevadas cantidades de fuerza, similar a la de un ser humano, se han elegido debido a sus reducidas dimensiones y precio. Una posible solución para su utilización con personas sería escalar los resultados con un sensor más sofisticado. Otra solución sería aumentar la superficie de apoyo con la membrana para dividir el peso.

TABLA 5.16. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS FSR.

Sensor	FSR	
Rango de fuerza (N)	0,1-10	
Resolución de la fuerza	Continua	
Rango de espesor (mm)	0,2-1,25	
Resistencia sin presión (MΩ)	>10	
Temperatura de trabajo (°C)	-30 hasta +70	
Precisión (N)	0,1	
Histéresis (%)	10	
Número de actuaciones testadas	10 millones	
Dimensiones Al x P x Ø (mm)	56,38 x 1.25 x 18,28	
Fuente: Interlink Electronics		

5.1.4. LCD 20X4 I2C

Aunque para una situación real no sería necesario una pantalla, en este proyecto se ha utilizado para parametrizar e indicar todo lo que ocurre en tiempo real. Se ha escogido una pantalla 20x4 (4 filas por 20 columnas) en lugar de una de 16x2 debido a la necesidad de mayor espacio para indicar velocidad del obstáculo que se aproxima, distancia, tiempo que tarda en llegar y situación de bloqueo de las puertas.

Estas pantallas, pensadas para su implementación para Arduino, tienen el problema de necesitar gran cantidad de pines de la placa de Arduino, al igual que la misma cantidad de cables y mayor complejidad en el código. Es por esto que se implementa un módulo

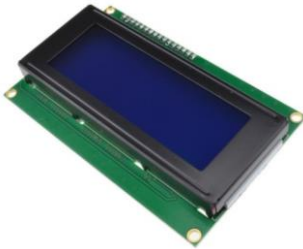
denominado I2C que le permite reducir todas las entradas a sólo 4, quedándose en GND, VCC, SDA y SCL. Ver figura 5.24.



Fig. 5.26. Dorsal de una pantalla LCD con el módulo I2C integrado.

Para este módulo es necesario tener los correspondientes pines SDA y SCL en la placa de Arduino.

TABLA 5.17. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS LCD.

Módulo LCD		I2C
Dirección I2C	0x3F	
Número de caracteres (píxeles)	20x4	
Contraste ajustable	Si	
Voltaje de alimentación (V)	5	
Tamaño del carácter (mm)	2,96 x 4,75	
Distancia entre caracteres (mm)	3,55 x 5,35	
Dimensiones Al x An x P (mm)	98 x 60 x 24	
Fuente: Iberobotics		


5.1.5. Buzzer

La única función del *buzzer* o zumbador piezoeléctrico no es más que la de alertar con señales acústicas al ocupante del vehículo que se dispone a abrir la puerta cuando la situación es peligrosa. Este *buzzer* vendría a sustituir al LCD en un caso práctico ya que sólo interesa saber cuándo no se puede salir del vehículo y un aviso a modo de alta frecuencia es suficiente para detener al ocupante y hacerle saber que algo está pasando.

El *buzzer* empleado ha sido de tipo activo ya que, al tratarse de un transductor electroacústico, requiere de un transistor y resistencias necesarios para su funcionamiento. Uno pasivo necesitaba una placa externa con estos componentes y sólo supone mayor complejidad en el diseño.

A su vez, el *buzzer* elegido tiene un diseño especial para integrar en una placa PCB (dependiendo del caso práctico y de la ubicación de la placa base, el *buzzer* podría conectarse externamente para que se escuche en el interior del vehículo) y con alimentación de 5V, ya que la placa de Arduino funciona con pines de 5V y se prescinde de una resistencia.

TABLA 5.18. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS BUZZER.


Buzzer	Activo	
Tensión de funcionamiento (V)	5	
Presión sonora a 10 cm (dB)	≥85	
Frecuencia de resonancia (Hz)	2300±300	
Temperatura de operación (°C)	-25 hasta +80	
Tono	Continuo	
Peso (g)	2	
Dimensiones Al x Ø (mm)	15 x 12	
Fuente: Sparkfun		

5.1.6. Led

En el caso, se ha utilizado un led de 5 mm de diámetro, aunque cualquier dimensión habría valido ya que su objetivo, al igual que el *buzzer*, es alertar al ocupante del vehículo de un peligro potencial. El led se ha conectado directamente a la placa PCB, pero podría haberse colocado externamente según el caso práctico.

A su vez, este led depende de conectarse en serie con una resistencia, en particular de 220 Ω , para evitar que se queme con los 5V que salen de la placa de Arduino.

TABLA 5.19. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS LED 5V.

Led	Rojo 5mm	
Tensión de funcionamiento (V)	1,8-2.2	
Tipo de corriente	Continua	
Corriente de funcionamiento (mA)	16-18	
Corriente máxima (mA)	20	
Intensidad luminosa (mcd)	150-200	
Dimensiones Al x Ø (mm)	36 x 5.8	
Fuente: Sparkfun		

5.2. Montaje del sistema

En este apartado se lleva a cabo el diseño y desarrollo del sistema conjunto de los componentes mencionados anteriormente. Este sistema está dividido en dos partes: el sistema eléctrico (disposición de todos los componentes electrónicos y sensores, cableado y conexión de todos ellos) y el sistema mecánico (mecanismo que simula el bloqueo de la puerta).

Ambos forman un sistema físico representando la parte del hardware, y con ayuda del software (código) trabajan conjuntamente para conseguir el propósito de este proyecto.

5.2.1. Sistema eléctrico

El sistema eléctrico está compuesto por todos los componentes eléctricos y electrónicos que influyen en el funcionamiento del sensor. Para el desarrollo de este apartado se ha tomado información del libro: *Integrated Circuit Engineering*. [26].

5.2.1.1. Circuito eléctrico

Para el desarrollo del circuito eléctrico y disposición de todos los componentes se ha utilizado el software Fritzing™ que permite diseñar de forma sencilla circuitos complejos con muchos componentes y cables. En la figura 5.25 se muestra, a la izquierda, el resultado de todos los componentes conectados mediante cableado; y a la derecha, la representación esquemática del circuito eléctrico.

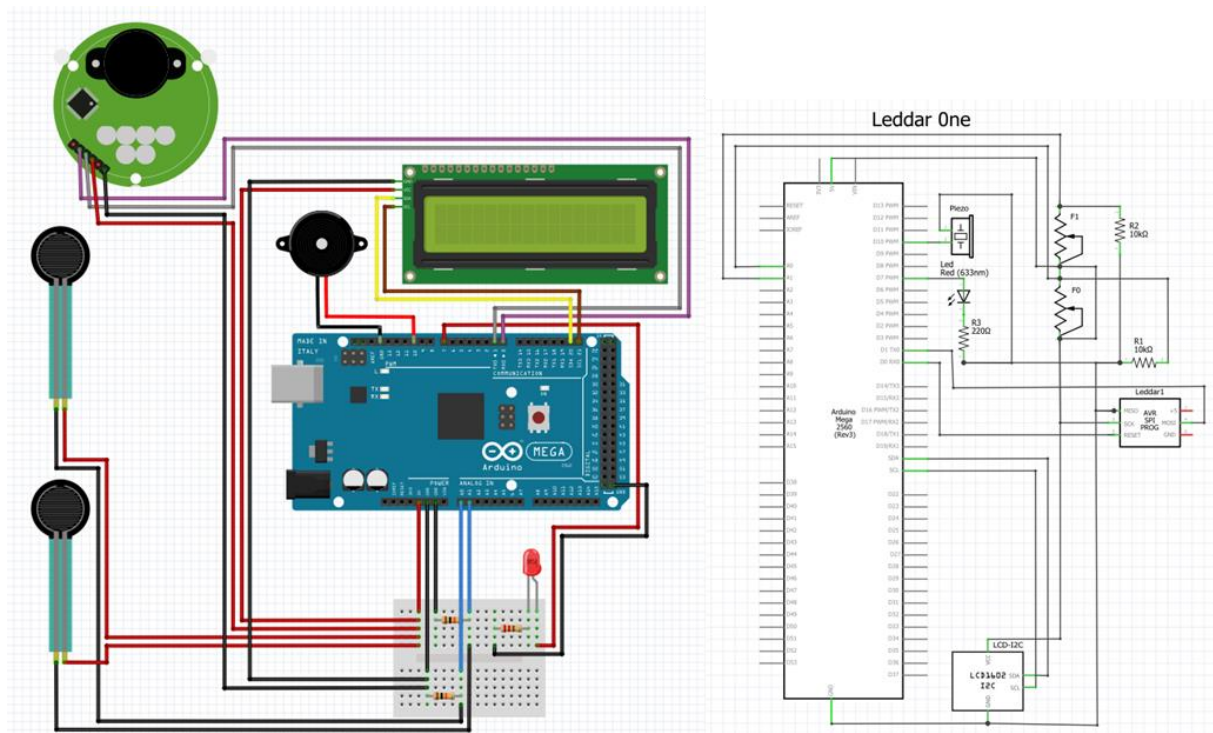


Fig. 5.27. Representación de las conexiones por Fritzing y esquema del circuito eléctrico.

Fue necesario utilizar una placa *protoboard* externa, la cual resultaba muy útil para la conexión en paralelo de distintos ramales al igual que la conexión de las resistencias y el led.

Aunque era el diseño eléctrico final, se trataba sólo de un prototipo que permitía comprobar que el código era correcto y hacer las distintas pruebas necesarias antes de su implementación en el diseño real.

Este proceso de pruebas permitía depurar el código y optimizar el sistema, a su vez que permitía determinar la necesidad de incorporar otros componentes de ser necesario.

El siguiente paso fue reducir la complejidad del montaje, el número de cables y componentes implementando el circuito en un circuito impreso o placa. Esta placa

consiste en una superficie por capas de material no conductor (resina de fibra de vidrio, cerámica, polímeros...) por la que circulan caminos, conocidos como buses, de material conductor (generalmente cobre). Estos caminos forman un circuito impreso que permite comunicar eléctricamente todos los componentes reduciendo el uso de cables, simplificando el diseño, reduciendo las dimensiones del circuito y sirve como base para todos los componentes electrónicos.

Con ayuda del software Fritzing™ y del circuito esquemático se pudo obtener un esquema del circuito en formato de placa PCB personalizado y exportar a PDF o SVG, para impresión PCB al ácido, o RS-274X, para producción profesional PCB.

En la figura 5.26 se representa, a la izquierda, el diseño de la placa para su impresión; y a la derecha la placa PCB impresa.

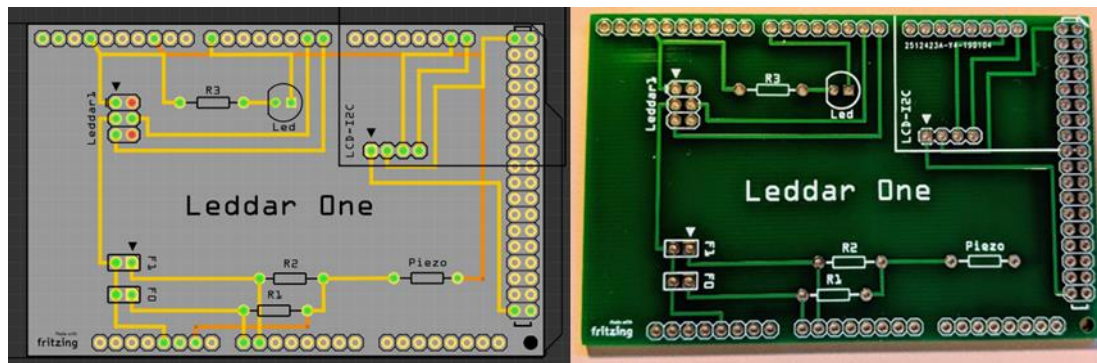


Fig. 5.28. Diseño en Fritzing de la placa para su impresión y placa PCB impresa.

Una vez que se tenía la placa impresa, el siguiente paso fue montar y soldar todos los componentes. Se optó por un diseño de placa, la cual se montaba encima de la placa de Arduino, aprovechando sus pines como soporte.

Para facilitar la conexión de los componentes externos se señaló con una pequeña flecha sobre la placa PCB para indicar la ubicación del pin correspondiente a tierra (GND).

5.2.1.2. Montaje del sistema eléctrico

La unión de todos los componentes eléctricos, resistencias, pines macho, led y *buzzer* a la placa base de PCB se ha realizado mediante soldadura. Para ello se ha utilizado una aleación de estaño y plomo de baja fusión adaptada a componentes electrónicos.

El resto de componentes, el sensor LiDAR, la pantalla LCD y los dos sensores de fuerza, eran elementos externos a la placa ya que iban separados de la base. Esto era debido a que se distribuirían por el vehículo y se conectarían mediante cable.

En el montaje eléctrico todos los componentes seguían una única dirección de ensamblaje, lo cual permitía agregarlos en una única operación de montaje. Para una línea de producción, este método garantiza reducir costes y tiempos, permitiendo depositar todos las piezas y el posterior baño de aleación derretida en la misma estación de montaje.

El plano de ensamblaje eléctrico de todos los componentes y sus direcciones de ensamblaje se adjunta en el Anexo D.

En la siguiente figura se adjunta a la izquierda, la placa PCB con todos los componentes soldados y montada sobre la placa de Arduino; y a la derecha, la placa PCB con los componentes externos conectados.

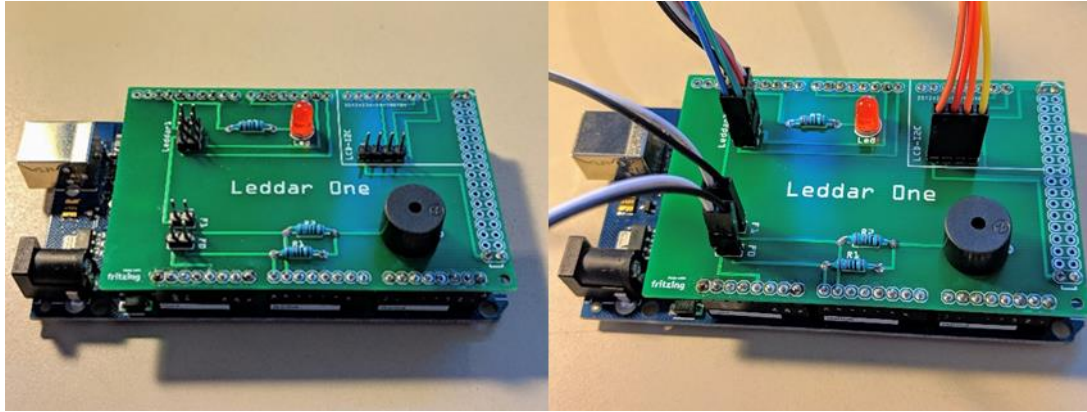


Fig. 5.29. Placa PCB montada sobre la placa de Arduino y con los componentes externos conectados.

La idea del circuito final era simplificar las conexiones y reducir la complejidad de montaje. De tal forma que finalmente sólo era necesario conectar manualmente los componentes externos.

Este concepto basado en un diseño modular permite conectar y desconectar los componentes fácil y rápidamente por si fuese necesario realizar algún mantenimiento o cambiar alguno de ellos por avería. También permite conectar un cable más largo por si las condiciones de diseño lo requiriesen.

5.2.2. Sistema mecánico

En el desarrollo mecánico del sistema, se elaboró un prototipo que permitía realizar los ensayos y pruebas reales. Este prototipo era una simple interpretación de cómo iría configurado el sistema y supuso sólo una estructura en la que se pudieran alojar todos los componentes a nivel funcional.

Sin embargo, para una concepción básica de funcionamiento es más que suficiente. En futuros trabajos se procederá a diseñar un sistema personalizado y concreto según el vehículo y modelo al que se le quiera implementar.

5.2.2.1. Diseño del prototipo y características

Para el desarrollo del prototipo, se ha elaborado una geometría tipo caja, tomando como modelo un RADAR de velocidad ordinario. Esta caja se ha diseñado con ayuda del software Solid Edge ST9, el cual permitía ajustar las medidas y tolerancias según los requisitos necesarios.

En el interior de esta caja se albergan todos los componentes y en su parte frontal se disponen la pantalla LCD y el sensor Leddar One.

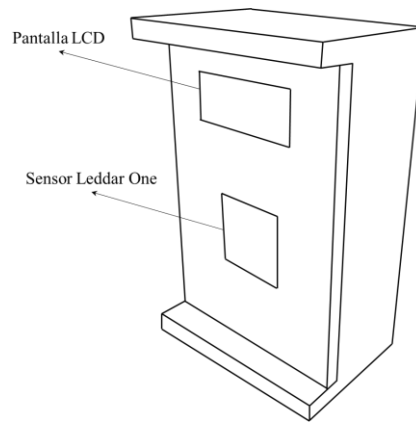


Fig. 5.30 Diseño conceptual del prototipo. Geometría inspirada en los radares de velocidad.

Para posibles ajustes del sistema, la caja no está sellada si no que la parte frontal tiene un mecanismo de apertura para un fácil acceso a su interior y componentes.

El sensor Leddar One se ubica en la parte frontal cuya orientación permite la captación de obstáculos. Así mismo se ha decidido colocar delante del sensor un cristal para protegerlo ante suciedad o posibles golpes.

El empleo de un cristal/metacrilato no afecta a la interacción del haz de luz infrarroja. No obstante, es importante situarlo paralelamente al telescopio receptor. Ya que, si existiera algún ángulo entre ambos, se obtendrían datos erróneos debido a la refracción producida por el plano inclinado.

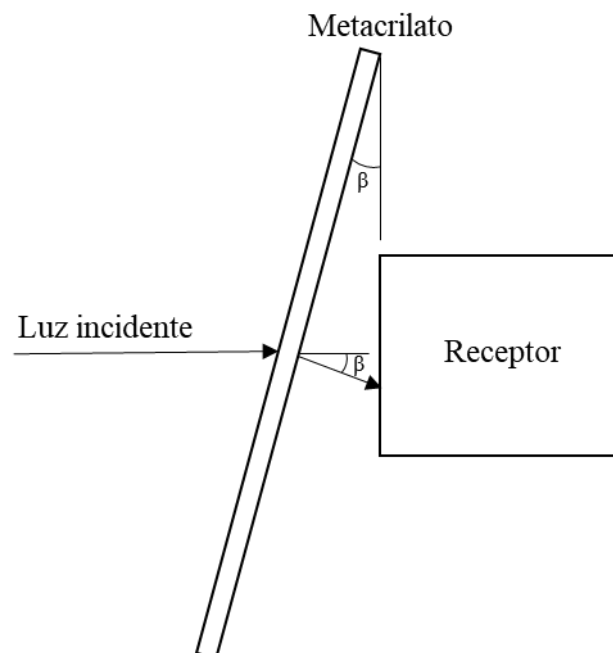


Fig. 5.31 Inclinación β de un plano que produce una desviación de β sobre el rayo incidente

Para la unión del sensor con el cristal surgió el siguiente problema: la base del Leddar One dispone de tres orificios orientados de forma frontal, esto hacía inevitable atornillarlo a través del cristal. Ver figura 5.30. Sin embargo, el cristal es un material muy frágil y resultaba muy difícil realizar operaciones de mecanizado sobre él.

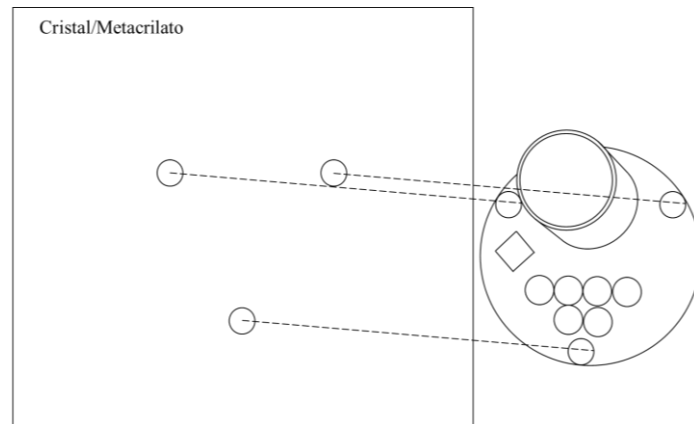


Fig. 5.32. Ubicación teórica de los orificios en el cristal/metacrilato para acoplar el Leddar One.

Es por esto que surgió la necesidad de buscar otra alternativa para unir ambos elementos. La idea consistía en desarrollar un soporte especial que sustituyera los orificios originales del sensor por otros con otra orientación.

Después de desarrollar varios conceptos posibles, se escogió un soporte que variaba la dirección de amarre en 90 grados, como se muestra en la siguiente figura.

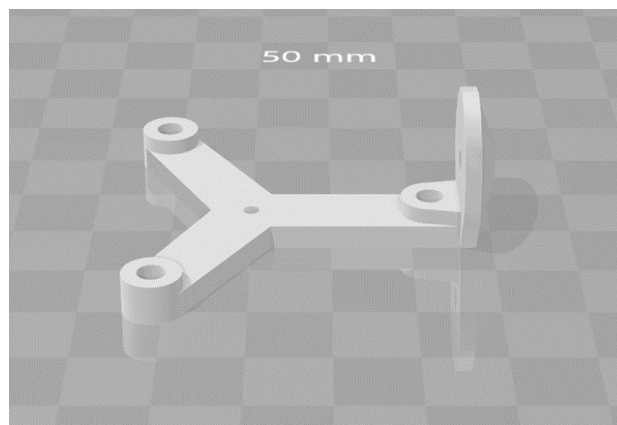


Fig. 5.33 Soporte especial para el Leddar One preparado para su impresión 3D.

Una vez que se tenía el diseño, se exportó en formato STL y se procedió a fabricarlo con una impresora 3D, obteniendo el siguiente resultado:

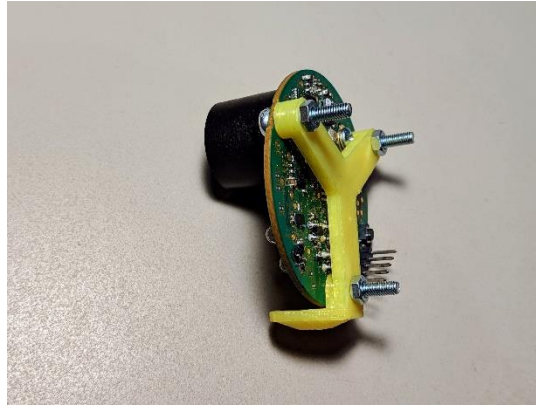


Fig. 5.34 Soporte impreso y montado en el sensor.

Para finalizar la instalación del sensor, se necesitaba otro elemento de soporte que uniera el nuevo soporte impreso con el cristal. Para ello se ha utilizado una escuadra de fijación con la particularidad de que uno de sus lados dispone de un carril. Ver figura 5.33. Este carril permitía colocar el sensor a una distancia concreta, lo que daba la posibilidad de acercarlo hasta tocar con el cristal y evitar que se formase un ángulo con el mismo.



Fig. 5.35. Soporte tipo escuadra para la unión del soporte del Leddar one con el cristal/metacrilato.

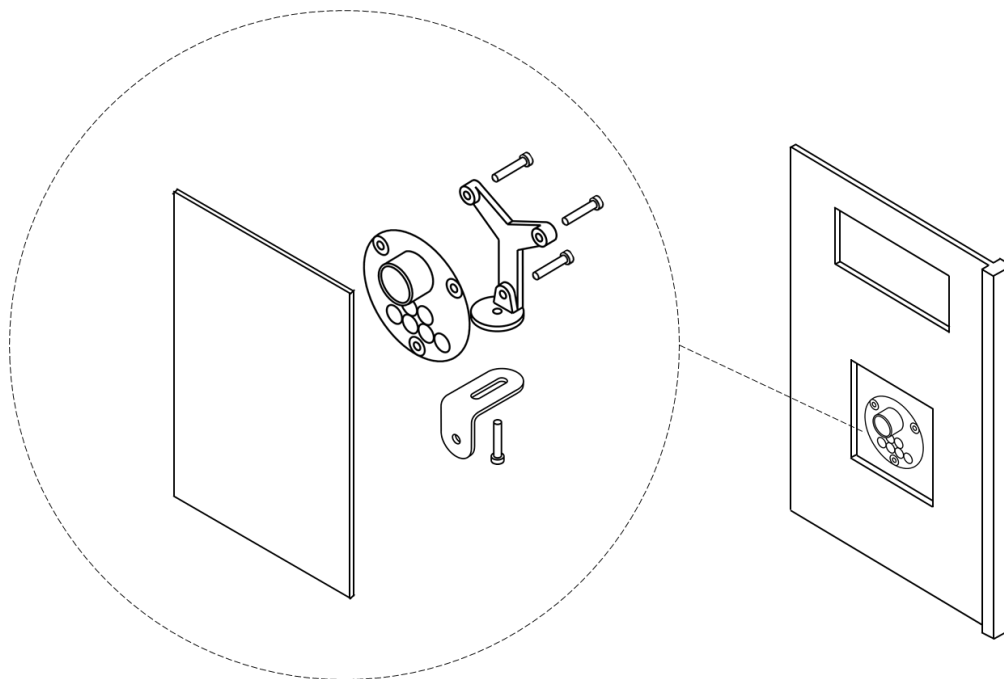


Fig. 5.36. Representación del conjunto de soportes, el sensor, y el metacrilato.

Tanto esquinera como metacrilato ofrecen superficies paralelas, por lo que, para evitar usar un tornillo, con el correspondiente taladrado en el cristal, se procedió a unir las con un pegamento adhesivo que garantizaba que ambas superficies estuvieran en contacto y se mantuvieran sus ángulos.

Para este prototipo se ha optado por alimentar la placa Arduino con una pila de 9 voltios, aunque se ha instalado una batería externa supletoria con conexión vía USB, ambas alojadas en el interior de la caja.

A su vez, para activar el circuito se utilizó un conmutador que se accionaría desde el exterior de la caja. Este conmutador en el prototipo simula a un relé que, en un caso real, se activaría con el velocímetro.

Este velocímetro, al detectar el vehículo parado, activaría el sistema LiDAR en modo *detección preventiva de obstáculos*, lo que equivale a la posición I del conmutador. Si detectase movimiento, el relé conmutaría al modo de *asistente de cambio de carril*, lo que equivale a la posición II del conmutador.

Los sensores de fuerza se ubicaron en la parte superior de la caja, lo cual permite accionarlos de forma cómoda y sencilla.

Finalmente, después de todas las mediciones y consideraciones para el desarrollo del sistema mecánico, se ha desarrollado el prototipo con el Solid Edge, obteniendo el siguiente resultado:

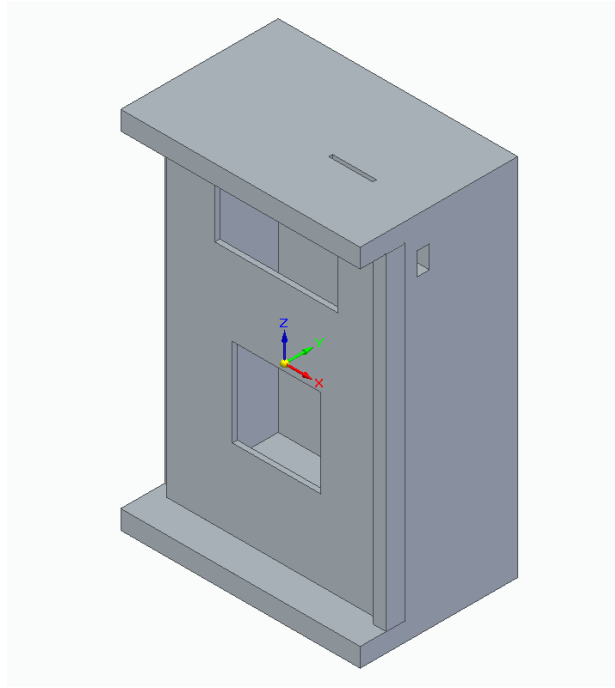


Fig. 5.37. Representación del prototipo final diseñado con Solid Edge ST9.

Los planos con la representación de las vistas y sus respectivas cotas de todas las piezas diseñadas en Solid Edge, se adjuntan en el Anexo C.

5.2.2.2. Ensamblaje y fabricación

Una vez teniendo el diseño final, se ha procedido a la fabricación y montaje del modelo real. Para la unión de todas las piezas se han utilizado pegamento adhesivo y tornillos ISO de métrica 3. Las direcciones de montaje son dos, por lo que se necesitan dos operaciones para el ensamblaje de los elementos mecánicos.

El montaje de todos los componentes, así como la ubicación y direcciones de ensamblaje se muestran en el Anexo D. En esta representación sólo se muestra la unión de los elementos estructurales y de soporte, por lo que es necesario añadir posteriormente el sistema eléctrico: placa Arduino, pantalla LCD, sensores de fuerza, interruptor, batería y cableado.

En las siguientes figuras se muestra el prototipo final después de su fabricación, con todos los componentes conectados:



Fig. 5.38. Resultado final del prototipo fabricado, ensamblado, pintado y funcionando.

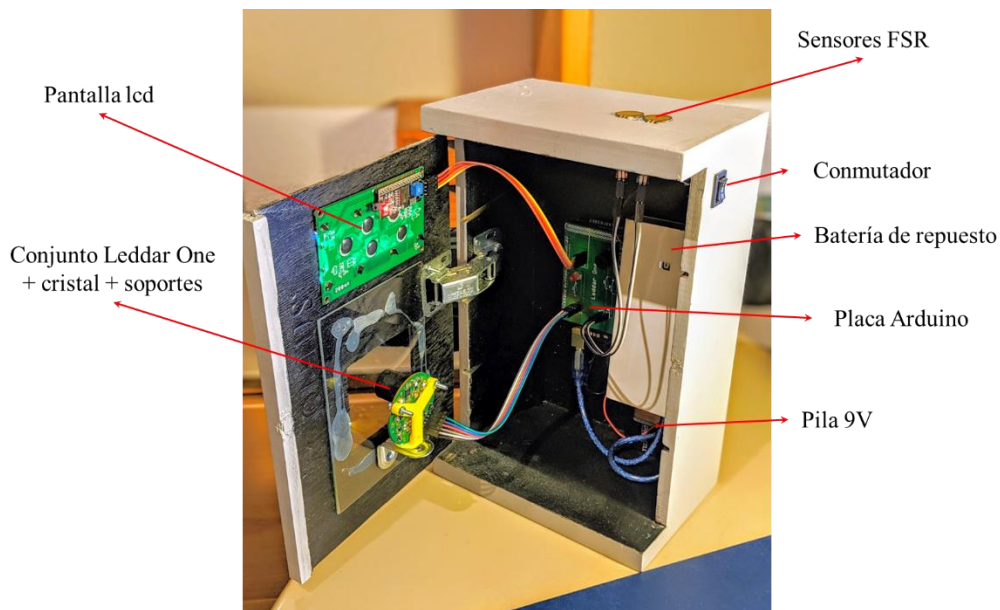


Fig. 5.39. Vista del interior del prototipo. Distribución de los componentes por la estructura.

5.2.3. Reglamentación y homologación de vehículos

La incorporación de un sistema LiDAR a un vehículo supone la modificación en su diseño y es necesario integrarlo de acuerdo a la normativa de homologación de vehículos que cumpla con la seguridad específica, tanto a nivel nacional, como a nivel global.

Nivel nacional

Según la normativa española, es posible instalar en un vehículo un sistema de detección de obstáculos, siempre y cuando su voltaje de funcionamiento sea el que ofrece la batería del vehículo y no se necesiten conversores de tensión adicionales.

Sin embargo, si la instalación del sistema supone una modificación en la carrocería externa, como provocar salientes para albergar el sensor LiDAR, es necesario acudir al documento correspondiente de la Reglamentación y Homologación de Vehículos de MINECO, Real Decreto 866/2010 (BOE 14.07.10).

Este documento es el Manual de reformas (Rev. 4), vehículos de categorías M, N y O, Artículo 8.51: *Modificaciones que afecten a la carrocería del vehículo*. [27].

Nivel Global

A nivel internacional, la normativa relativa a la Seguridad Funcional de los Automóviles es la ISO 26262, que se refiere a todos los sistemas eléctricos o electrónicos encargados de la seguridad del vehículo. [28].

Estos sistemas deben cumplir con las exigencias marcadas y deben superar una prueba que registra si son capaces de reaccionar ante posibles situaciones peligrosas y cómo puede reaccionar el conductor.

6. PUESTA EN MARCHA Y PROGRAMACIÓN

Después del desarrollo del hardware, se procedió a desarrollar el software que hace funcionar el sistema como es deseado. El software usado es Arduino™ debido a su versatilidad y facilidad de uso, que es más que suficiente para el proyecto.

Los conocimientos necesarios para el lenguaje de programación de Arduino se han adquirido con el libro *Arduino, curso práctico de formación*. [29].

Antes de empezar con la programación, era necesario determinar todas las variables y parámetros posibles que podían dar lugar a una situación peligrosa. De este modo, se trataba de buscar la forma en la que el sistema fuera capaz de detectar la presencia de cualquier peligro y actuar para evitar el accidente.

La circunstancia peligrosa hace referencia a que el tiempo que tarda el obstáculo que se aproxima es lo suficientemente pequeña para que el ocupante no tenga tiempo de salir del vehículo, considerando como obstáculo cualquier vehículo, motocicleta, bicicleta o persona.

Para saber cuánto tiempo iba a tardar el obstáculo en llegar al sensor, era necesario saber a qué velocidad se desplazaba y la distancia a la que se encontraba del sensor.

6.1. Cálculo de la distancia

Para la medición de la distancia, se ha utilizado la metodología de tiempo de vuelo o TOF, el cual se basa en la reflexión directa. Este método consiste en que el emisor lanza una señal de luz y los haces de luz rebotan con los objetos para ser captados nuevamente por el receptor en un intervalo de tiempo.

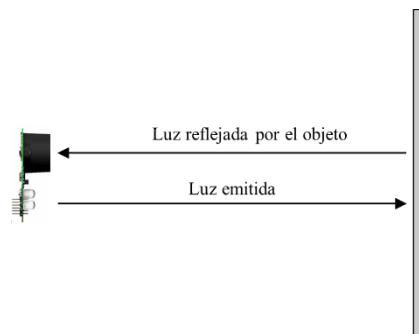


Fig. 6.40. Método de reflexión directa para la medición con el procedimiento TOF.

La distancia se obtiene haciendo uso de la fórmula de velocidad instantánea para un MRU (Movimiento Rectilíneo Uniforme):

$$v = \frac{x}{t} ; x = vt \quad (6.8)$$

Para ello es necesario conocer el tiempo que tarda el haz de luz en llegar al receptor desde que sale del emisor. También es necesario conocer la velocidad de la luz, que medida en

el vacío es una constante universal de 299.792.458 m/s, aunque se redondea a 300.000.000 m/s. Por tanto:

$$x = vt = (3 \times 10^8)t$$

Con la expresión obtenida, para cada valor de “t” en segundos, se puede obtener una distancia en metros. Esta distancia es necesario dividirla entre 2, ya que se obtiene la distancia recorrida por la luz, la cual es el doble de la distancia a la que se encuentra el sensor:

$$x = vt = (1,5 \times 10^8)t$$

En este método de reflexión directa existe un pequeño intervalo de tiempo a medir, como se muestra en la siguiente figura:

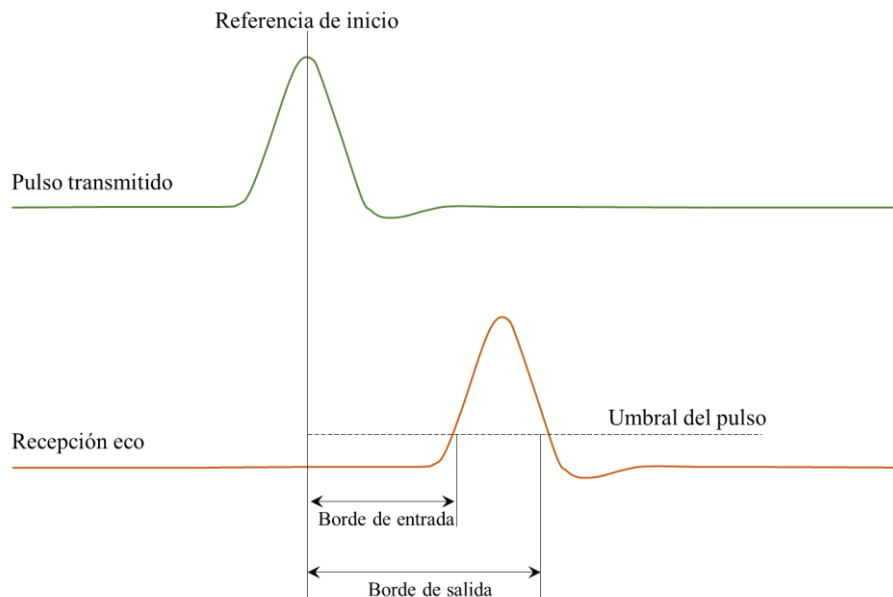


Fig. 6.41. Intervalo de tiempo de recepción de pulso.

Aunque son escalas de tiempo muy pequeñas, en términos de la velocidad de la luz pueden suponer un error muy importante, por lo que para obtener mediciones muy precisas es necesario utilizar un método de conversión de tiempo a digital. Este método de conversión resultaba ser lo más adecuado debido a que en lógica digital resultaría inviable operar con frecuencias de velocidad de reloj muy elevadas

También fue necesario tener en cuenta el tiempo que necesitaba el fotodetector en convertir los pulsos de luz en eléctricos para procesarlos, los cuales se podían corregir aplicando una ponderación.

Sin embargo, para esta operación de medir distancia, la empresa Leddartech™ proporciona una librería leddar.h para Arduino con la que mediante un *array* o vector se obtiene el valor de distancia.

No obstante, los valores obtenidos por la librería mostraban una inexactitud constante y proporcional al dato real, por lo que fue necesario desarrollar un proceso de calibración del sensor mediante un método de media de ponderaciones que permitió ajustar la adquisición a la expresión. Este método se adjunta en el Anexo E.

En la tabla E.1 del Anexo E se representan, para cada 5 cm, los valores obtenidos por el sensor frente a la distancia real en centímetros.

Después de obtener ponderaciones consecutivas para cada distancia, se calculó una media de ponderación de 17,79873556 que equivale a la desviación proporcional de los valores teóricos.

La ponderación calculada se divide entre los valores iniciales para obtener un valor en *cm* con un error en relación al real que oscila entre el 6% al 0%.

Se ha considerado que, valores con un error superior al 10%, son lo suficientemente conflictivos para alterar a la media de la ponderación total. Por lo tanto, la media de las ponderaciones tiene en cuenta a todos los valores excepto al primero, medido a 15 cm.

Aplicando la conversión a metros y dividiendo entre 0,05 segundos (retardo entre dos pulsos), la conversión a la velocidad en *m/s* y *km/h* se representa en la tabla E.2.

Por tanto, para obtener distancias en metros sólo es necesario multiplicar por 0,00056184, y para obtener velocidad en *km/h* es necesario multiplicar por 0,04045231 la resta de las distancias.

En la figura E.1 se adjunta, para cada 5 cm de medición, una representación gráfica de la evolución de los valores teóricos con los reales. Se observa una progresión lineal y constante equiparable a una recta de pendiente 17,7987356.

6.2. Cálculo de la velocidad

Una vez obtenida la distancia era necesario conocer una segunda distancia para saber el espacio que había recorrido el obstáculo en un instante determinado de tiempo. Para ello se especificó en el programa un retardo de tiempo o *delay* para luego tomar la segunda medida. En el programa se utilizó un *delay* de 50 milisegundos, por tanto:

$$v = \frac{\Delta x}{t} ; v = \frac{(distancia1 - distancia2)}{0.05} \quad (6.9)$$

Para el cálculo de la velocidad, se tuvo que considerar que el valor obtenido podía ser tanto positivo como negativo. En el programa se descartan los negativos, ya que una velocidad negativa implica que la segunda distancia es mayor que la primera, y esto a su vez implica que el obstáculo se está alejando del sensor.

Es evidente que una situación peligrosa sería la del obstáculo aproximándose y no alejándose. Por lo que en el código sólo se consideraron velocidades mayores que cero.

6.3. Cálculo del tiempo

Una vez se ha calculado la velocidad y sabiendo la distancia a la que se encontraba el obstáculo⁴, se podía conocer el tiempo que el obstáculo tardaba en llegar al sensor:

$$v = \frac{x}{t} ; t = \frac{x}{v} = \frac{(distancia2 - 0)}{v} \quad (6.10)$$

En el cálculo del tiempo se ha tenido en cuenta la posibilidad de que el obstáculo que se aproxima no vaya a velocidad constante, por lo que el tiempo se calcula en función de la velocidad medida en cada instante de tiempo. Esto se traduce en cambios bruscos del tiempo pudiendo saltar entre varios segundos.

Finalmente, era necesario establecer un límite de tiempo para que el ocupante del vehículo pudiera abandonarlo. Este tiempo, según datos experimentales tomados en distintas circunstancias, se estimó en una media de 3 segundos.

Por lo que si el tiempo que tarda el objeto que se aproxima es inferior a 3 segundos, la puerta se bloquea y permanece así hasta que el tiempo sea superior.

La puerta también se desbloquea cuando el valor del tiempo restante sea cero, ya que ese valor indica, o bien que la velocidad relativa es nula (hay un objeto en el alcance del sensor, pero está parado) o que el sensor no detecta ningún objeto.

El código empleado en Arduino se adjunta en el Anexo B, además se adjunta el código con todas sus anotaciones para una mayor aclaración.

A continuación, se adjunta una figura en la que se puede apreciar el LCD mostrando parámetros en un experimento real.

⁴ Aunque no hay mucha diferencia entre la primera y la segunda distancia, ya que existe un retardo pequeño (50 milisegundos), lo correcto es utilizar en la ecuación (7.10) la segunda distancia que es la última que se calculó y la que determina donde se encuentra el obstáculo en el instante en el que se calcula la velocidad.

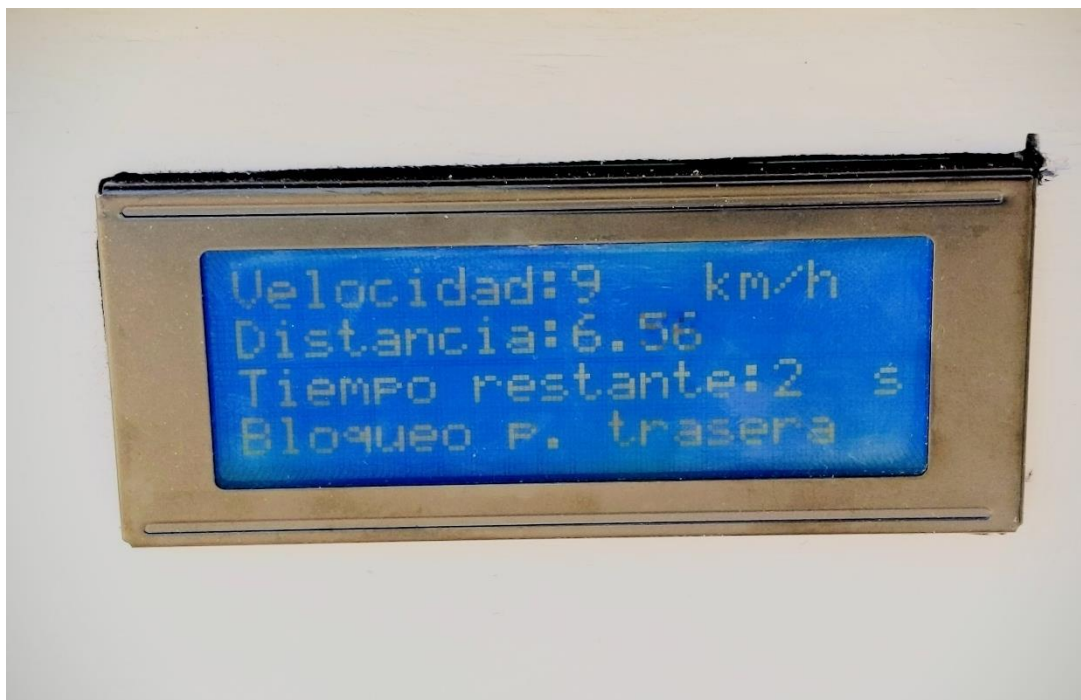


Fig. 6.42. Pantalla LCD mostrando resultados obtenidos en tiempo real en una prueba.

En la figura se muestra un vehículo aproximándose a 9 km/h, el cual se situaba a una distancia de 6,5 metros en el momento de la captura. Esto supone un tiempo de llegada de 2,6 segundos (aunque en el LCD se muestra en números enteros para facilitar la captura). En este ensayo en particular se estaba ejerciendo presión sobre el sensor correspondiente al asiento trasero y, como el tiempo restante era inferior a 3 segundos, el sistema procedió al bloqueo de la puerta trasera dejando habilitada la delantera al no detectar ocupante en su asiento.

7. IMPACTO ECONÓMICO

Para la fabricación del prototipo se han tenido en cuenta los siguientes factores económicos: costes de materiales, costes de fabricación y costes de personal.

7.1. Costes de materiales

Los costes materiales suponen todos los componentes utilizados en el prototipo, desde los elementos más relevantes hasta elementos auxiliares pero necesarios para el sistema.

El precio de cada elemento individual, así como el precio final de todos los materiales se adjunta en la siguiente tabla:

TABLA 7.20. COSTES DE MATERIALES.

Concepto	Valor (€)
Sensor Leddar One	100
Arduino mega 2560 R3	30
Placa PCB	15
Lcd 20x4	9
Led y cableado	5
Sensores FSR x2	3
Buzzer	1
Otros (madera, metacrilato, tornillos, etc)	30
Total	193 €

7.2. Costes de fabricación

Los costes de fabricación son todos aquellos necesarios para producir el sistema. Estos costes no tienen un valor fijado como los de los materiales y deben ser calculados en función de todos los recursos utilizados.

Para calcularlos se desarrolló una nueva tabla que incluía el coste de cada recurso y se multiplicaba por el tiempo en el que se ha usado cada recurso.

El coste de cada recurso estaba calculado en función del origen dónde se realiza el prototipo, en este caso España, por lo que los valores obtenidos son susceptibles de cambios en función de cada región.

La fabricación del sistema llevó un total de 9 días de los cuales se trabajó de media unas 6 horas diarias. Esto supone un total de 54 horas totales.

En estas 54 horas se hizo un uso constante de luz, tanto para iluminación como para el empleo de diversas herramientas eléctricas, a razón de aproximadamente 1 kW de consumo a la hora y se calcula en función del precio del kWh en España:

$$C_{luz} = C_{kWh} \times tiempo \quad (7.11)$$

$$C_{luz} = 0,1255 \times 54 = 6,77\text{€}$$

Las herramientas usadas fueron en su mayoría de mecanizado: sierra circular, serrucho, taladro y lijadora. Por tanto, estas herramientas son las que más desgaste van a suponer con respecto a otras y serán las más relevantes.

$$C_{utillaje} = \frac{t_{uso}}{t_{vida}} C_{repuesto} \quad (7.12)$$

Para el tiempo de uso se ha calculado que, de las 6 horas diarias dedicadas a la fabricación del sistema, 3 de ellas requerían el uso de herramientas de mecanizado. Por lo tanto, el tiempo de uso promedio de herramientas de mecanizado en los 9 días fue de 27 horas.

A su vez, hay que dividir este coste por cada utillaje, ya que cada uno tiene un ciclo de vida y un precio de recambio.

$$C_u = \frac{t_{broca}}{t_{vida}} C_{broca} + \frac{t_{sierra}}{t_{vida}} C_{sierra} + \frac{t_{serrucho}}{t_{vida}} C_{serrucho} + \frac{t_{lijadora}}{t_{vida}} C_{lijadora} \quad (7.13)$$

Debido a que existen variabilidades de desgaste de la herramienta y diversas condiciones que lo provocan, se ha decidido hacer una ponderación aproximada que determina un desgaste igual y la misma vida útil para todas las herramientas. Este tiempo de vida útil se estima de unas 1000 horas.

$$C_u = \frac{t_{uso}}{t_{vida}} (C_{broca} + C_{sierra} + C_{serrucho} + C_{lijadora}) \quad (7.14)$$

$$C_u = \frac{3 \times 9}{1000} (3 + 30 + 12 + 8) = 1,431\text{€}$$

El transporte también generó gastos debido a que se necesitaron varios desplazamientos para la compra de materiales. Esto se realizó con un vehículo diésel con un consumo de 5,5 l/100km y se recorrieron un total de unos 100 km. El precio del diésel en España es de unos 0,9 €/l aproximadamente, por lo tanto, los costes de transporte fueron:

$$C_{transporte} = Consumo \times C_{diésel} \times d_{recorrida} \quad (7.15)$$

$$C_{transporte} = 4,95€$$

Otro gasto de producción a tener en cuenta fueron las materias primas que se emplearon para la fabricación: *stick* de silicona e hilo de soldadura.

Estos gastos se calculan fácilmente en función de la cantidad consumida por su precio en el mercado. De la silicona se usó un *stick* completo y del estaño se empleó un envase entero.

El coste total de los gastos de fabricación se recoge en la siguiente tabla:

TABLA 7.21. COSTES DE FABRICACIÓN.

Concepto	Valor mercado	Uso	Valor (€)
Luz (Endesa)	0,1255 €/kWh	54 horas	6,78
Herramientas (desgaste)		27 horas	1,43
Broca de taladrado	3 €	-	0,08
Sierra circular	30 €	-	0,81
Filo serrucho	12 €	-	0,32
Almohadilla abrasiva lijadora	8 €	-	0,22
Transporte (Consumo 5,5 l/100 km diésel)	0,9 €/l	100 km	4,95
Materia prima para la construcción		-	3,50
<i>Stick</i> de silicona (pegamento)	0,5 €	-	0,50
Rollo de hilo de soldadura	3 €	-	3,00
Total			22 €

7.3. Costes de personal

Estos costes engloban tanto el sueldo de empleados encargados del uso de máquinas y herramientas, como el sueldo de un ingeniero encargado del desarrollo del proyecto. También sería necesario contar con el sueldo del personal encargado de la calidad y revisiones del producto final.

Sin embargo, para el proyecto en concreto, sólo se ha tenido en cuenta como personal a un ingeniero, el cual se encarga de la mano de obra y gestión de la calidad.

Un ingeniero mecánico recién titulado en España cobra de 1500 a 2000 euros mensuales a jornada completa. Este sueldo equivale a los 20 días laborables de un mes, lo que se traduce en torno unos 12 €/hora.

Este proyecto ha durado un total de 161 días, de los cuales laborables unos 106 aproximadamente. Estos 106 días trabajando a jornada completa con un sueldo de 12 €/hora equivalen a unos gastos totales de 10176 €.

TABLA 7.22. COSTES DE PERSONAL.

Concepto	Valor (€)
Sueldo ingeniero (€/hora)	12
Días trabajados	106
Horas trabajadas	848
Sueldo total	10.176 €

7.4. Costes totales

Sumando los costes de materiales, de fabricación y de personal se obtiene un total de valor invertido en este proyecto, el cual es:

$$C_{TOTAL} = C_{mat} + C_{fab} + C_{pers} \quad (7.16)$$

TABLA 7.23. COSTES TOTALES.

Concepto	Valor
Costes de materiales	193 €
Costes de fabricación	22 €
Costes de personal	10.176 €
Coste total	10.391 €

Este valor obtenido es el correspondiente al prototipo, pero no es un valor significativo para el modelo final. Para el modelo final, listo para su comercialización se deben tener una serie de consideraciones:

Para los costes de materiales, se debe tener en cuenta que la mayor parte de componentes empleados serán sustituidos por otros, ya que estos componentes han sido seleccionados para un diseño de prototipo y cuyas limitaciones se pueden escalar con otros componentes.

Es posible que se necesite otro sensor LiDAR de mayores prestaciones y alcance, lo cual puede incrementar el precio el doble o triple de su valor.

El resto de componentes como el sistema de control del automóvil y los sensores de fuerza ya vienen de serie en los vehículos, por lo que se prescindiría de este coste aprovechando los ya existentes.

Para los gastos de fabricación es necesario considerar que en una fábrica automovilística se produce en serie y en grandes cantidades, lo que reduce los costes en comparación a los de fabricación del prototipo.

El coste de personal también se vería afectado, dependiendo de la automatización y las tecnologías que se emplee en producción, habrá más o menos personal, lo cual se traduce directamente al sueldo.

8. CONCLUSIONES Y FUTUROS ESTUDIOS

8.1. Conclusiones

El desarrollo del proyecto se ha centrado en los automóviles autónomos y las tecnologías empleadas en esta industria, con el objetivo de aportar un nuevo desarrollo y aplicación.

Ha permitido desarrollar nuevos conocimientos sobre la tecnología LiDAR y conocer sus propiedades y funcionalidades.

El sistema LiDAR desarrollado en este proyecto cumple con las expectativas iniciales obteniendo resultados correctos y fiables. El sensor Leddar One ha sido suficiente para la captación y procesamiento de datos. Su precio reducido ha permitido poder adquirirlo para hacer los respectivos ensayos experimentales.

No obstante, este sensor no es el más adecuado, debido a que su alcance máximo teórico es de 40 metros (36 en pruebas experimentales).

Este alcance puede ser suficiente para vías urbanas y residenciales. Sin embargo, si otro vehículo que se aproxima supera los 50 km/h, este recorre los 40 metros de alcance en muy poco tiempo. Es por esto que, en vías donde el límite de velocidad es superior como en carreteras convencionales o autopistas, el sensor no tendrá capacidad de actuación.

También es cierto, que la mayoría de accidentes por la apertura de la puerta se producen en vías urbanas, pero lo ideal en un sistema de seguridad activa es que sea capaz de funcionar en cualquier situación para poder ofrecer el mayor nivel de seguridad posible.

8.2. Futuros estudios

Para estudios futuros se intentará probar con otros sensores de mayor alcance o combinar el Leddar One con otras tecnologías para mayor amplitud de rango.

En cuanto al sistema conjunto diseñado, no es más que un prototipo el cual permite realizar los ensayos pertinentes. Sin embargo, este sistema necesitará futuras adaptaciones tanto mecánica como eléctrica/electrónicamente.

En el sistema mecánico se desarrollaría una siguiente versión adaptada para su integración en un vehículo real. Esta nueva versión dependería del tipo y modelo del vehículo al que se le vaya a implementar, teniendo en cuenta dónde se alojarían todos los componentes incluidos el sensor LiDAR.

También se tratará de ocultar el sensor dentro del espejo retrovisor, el cual dispone de suficiente espacio para albergar tanto sensor como la electrónica necesaria.

Se considerará la utilización de otro material alternativo al clásico espejo retrovisor, que ofrezca la posibilidad de que el haz laser pueda atravesarlo al mismo tiempo que ofrezca el efecto espejo para el conductor. Un ejemplo de estos sería el metacrilato de un único sentido.

El sistema eléctrico necesitaría una reestructuración completa, debido a que Arduino ha sido de gran ayuda para este proyecto, pero se consideran más potentes y fiables otros chips de procesado que integran los distintos vehículos. Estos chips funcionan con un software específico de cada compañía de vehículos, por lo que el código será completamente distinto. Este cambio eléctrico, al igual que el mecánico, se realizaría una vez que se conozca el vehículo al que se le implementaría.

Otros componentes empleados como la pantalla LCD o el interruptor, han sido de gran ayuda para el proyecto. Pero en una situación real estos se eliminarían, ya que no es necesaria una pantalla que indica las velocidades y distancias de otros vehículos, y el conmutador sería un relé que se accionaría conjuntamente con el velocímetro del coche.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] RTVE.es/ AGENCIAS. “Día Mundial de las Víctimas de Accidentes de Tráfico”. RTVE. <http://www.rtve.es/noticias/20181118/cada-25-segundos-muere-persona-mundo-accidente-traffic/1840300.shtml> (acceso: 2 de diciembre de 2018).
- [2] Euro NCAP. “INTERPRETACIÓN DE LAS ESTRELLAS”. Euroncap. <https://www.euroncap.com/es/euro-ncap/interpretaci%C3%B3n-de-las-estrellas/> (acceso 18 de septiembre de 2018).
- [3] Society of Automotive Engineers. “Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles”. SAE. https://www.sae.org/standards/content/j3016_201806/ (acceso: 18 de septiembre de 2018).
- [4]. A. Roncero. “El precio de la seguridad total en mercedes: hazte un ‘escudo’ por 2.500 euros”. Auto10. <https://www.auto10.com/actualidad/el-precio-de-la-seguridad-total-en-mercedes-hazte-un-escudo-por-2500-euros/15547> (acceso: 21 de septiembre de 2018).
- [5] A. Lois. “Audi A8 2018 y su escáner láser, un coche casi de ciencia ficción”. Autopista. <https://www.autopista.es/tecnologia/articulo/audi-a8-2018-escaner-laser-coche-ciencia-ficcion-video> (acceso: 22 de septiembre de 2018).
- [6] K. Puerto. “Esta es la tecnología necesaria para pasar de Autopilot a conducción autónoma en Tesla Motors: Hardware 2”. Xakata. <https://www.xataka.com/vehiculos/para-pasar-del-autopilot-a-la-conduccion-autonoma-en-los-coches-de-tesla-hace-falta-hardware-2> (acceso: 23 de septiembre de 2018).
- [7] E. Viso. “El coche autónomo de Ford: más de una década de desarrollo para su desembarco definitivo en 2021”. Diario Motor. <https://www.diariomotor.com/espacio-ford/2016/07/30/que-modelos-de-ford-que-se-fabrican-en-almussafes/> (acceso: 23 de septiembre de 2018).
- [8] S. Szymkowski. “Volkswagen ID electric car to launch in 2020 along with new VW Golf”. Green Car Reports. https://www.greencarreports.com/news/1112739_volkswagen-id-electric-car-to-launch-in-2020-along-with-new-vw-golf (acceso: 25 de septiembre de 2018).
- [9] R. Álvarez. “El coche autónomo de Google (Waymo) se vuelve completamente autónomo y por primera vez sale a la calle sin conductor”. Xakata. <https://www.xataka.com/automovil/el-coche-autonomo-de-google-waymo-se-vuelve-completamente-autonomo-y-por-primera-vez-sale-a-la-calle-sin-conductor> (acceso: 26 de septiembre de 2018).
- [10] N. La Rocco. “Personal CoPilot: BMW i3 fährt autonom nach, SAE-Level 5”. Computer Base. <https://www.computerbase.de/2018-02/bmw-i3-personal-copilot/> (acceso: 26 de septiembre de 2018).

[11] A. Prieto Amaya. “NIO EP9: Con 1.300 CV eléctricos y sin conductor, arrasó en Nürburgring y repite jugada en COTA”. Auto noción. <https://www.autonocion.com/nio-ep9-con-1-300-cv-electricos-y-sin-conductor-arraso-en-nurburgring-y-repite-jugada-en-cota/> (acceso: 30 de septiembre de 2018).

[12] Yamaha Motor Corporation USA. “MOTOROiD Reference vehicle”. Global Yamaha Motor. <https://global.yamaha-motor.com/showroom/event/tokyo-motorshow-2017/exhibitionmodels/motoroid/> (acceso: 1 de octubre de 2018).

[13] L. Montoro González, A. Martí-Belda Bertolín, I. Lijarcio, P. Bosó, y C. López, *Coche Autónomo, seguridad vial y formación de conductores*, 2018. [En línea].

Disponible en:

https://www.cnae.com/ficheros/files/noticias/INFORME%20Coche%20autónomo%20seguridad%20vial%20y%20formación%20de%20conductores_%20INTRAS-CNAE.pdf

[14] A. Staravoi tau. “Visualizing lidar data”. El blog de Alex Staravoi tau. <https://navoshta.com/kitti-lidar/> (acceso: 20 de septiembre de 2018).

[15] Bosch. “Mid-range radar sensor (MRR)”. Bosch Mobility Solutions. [https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/predictive-emergency-braking-system/mid-range-radar-sensor-\(mrr\)/](https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/predictive-emergency-braking-system/mid-range-radar-sensor-(mrr)/) (acceso: 22 de octubre de 2018).

[16] Bosch. “Mittelbereichsradersensor (MRR rear)”. Bosch Mobility Solutions. <https://www.bosch-mobility-solutions.de/de/produkte-und-services/pkw-und-leichte-nutzfahrzeuge/fahrerassistenzsysteme/spurwechselsassistent/mittelbereichsradersensor-mrrrear/> (acceso: 22 de octubre de 2018).

[17] AutonomouStuff, *Delphi SRR2 Rear and Side Detection System*, 2016. [En línea]. Disponible en https://www.autonomoustuff.com/wp-content/uploads/2016/08/srr2_data_sheet.pdf

[18] AutonomouStuff. “Delphi ESR 2.5”. AutonomouStuff. <https://autonomoustuff.com/product/delphi-esr-2-5-24v/> (acceso: 26 de octubre de 2018).

[19] Woodside Capital Partners, *The Automotive LiDAR Market*, 2018. [En línea].

Disponible en http://www.woodsidecap.com/wp-content/uploads/2018/04/Yole_WCP-LiDAR-Report_April-2018-FINAL.pdf

[20] Leddartech, *LEDDARVU 8-SEGMENT SOLID-STATE LiDAR SENSOR MODULES*, 2018. [En línea].

Disponible en https://leddartech.com/app/uploads/dlm_uploads/2017/12/Spec-Sheets-LeddarVu-12avril2018-ENG-web.pdf

[21] Leddartech, *LEDDAR M1616-SEGMENT SOLID-STATE LiDAR SENSOR MODULES*, 2018. [En línea]. Disponible en https://leddartech.com/app/uploads/dlm_uploads/2018/04/Spec-Sheets-M16-54C0001-8EN.pdf

- [22] C. Weitkamp, *Lidar, range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*, Vol. 1. New York: Springer Science & Business, 2005. [En línea].
Disponibile en <https://link.springer.com/book/10.1007%2Fb106786>
- [23] *Láseres y equipos asociados a los láseres*, UNE-EN ISO 11151- 2015.
- [24] *Optics and photonics -- Optical coatings*, ISO 9211 - 2012.
- [25] Interlink Electronics, *FSR 402 Data Sheet*, 2010. [En línea]. Disponible en <http://www.trossenrobotics.com/productdocs/2010-10-26-datasheet-fsr402-layout2.pdf>
- [26] L. J. Herbst, *Integrated Circuit Engineering: Establishing a Foundation*, Vol. 4. Michigan University: Oxford University Press, 1996.
- [27] MINECO, Manual de reformas de vehículos, Rev. 4. España, 2010. [En línea].
Disponibile en http://www.f2i2.net/documentos/lsi/STO_Vehiculos/Reformas/ManualReformasVehiculosRev4.pdf
- [28] *Road vehicles -- Functional safety*, ISO 26262 - 2011.
- [29] O. Torrente Artero. *Arduino. Curso práctico de formación*, 1ª Ed. México: Alfaomega, 2013.



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN PREVENTIVA DE OBSTÁCULOS EN VEHÍCULOS TIPO TURISMO by Carlos Gil García is licensed under a [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Anexo A. Actividades desarrolladas y duración del proyecto

TABLA A. 1. DESARROLLO DE ACTIVIDADES

Actividad	Fecha inicio	Duración en días	Fecha fin
Determinación del producto, necesidad y funciones	10-sep	7	17-sep
Estado del arte y determinación de los objetivos	17-sep	15	02-oct
Selección de la tecnología a utilizar	02-oct	6	08-oct
Profundización en la tecnología seleccionada	08-oct	14	22-oct
Estudio de mercado	22-oct	12	03-nov
Compra de sensores y desarrollo del sistema	03-nov	21	24-nov
Adquisición de conocimientos de programación	03-nov	28	01-dic
Desarrollo del código	01-dic	30	31-dic
Diseño y construcción del prototipo	01-ene	9	10-ene
Ensayos reales prototipo	10-ene	4	14-ene
Optimizar y finalizar el código	14-ene	7	21-ene
Ensayos finales	21-ene	2	23-ene
Elaboración de memoria	21-ene	28	18-feb

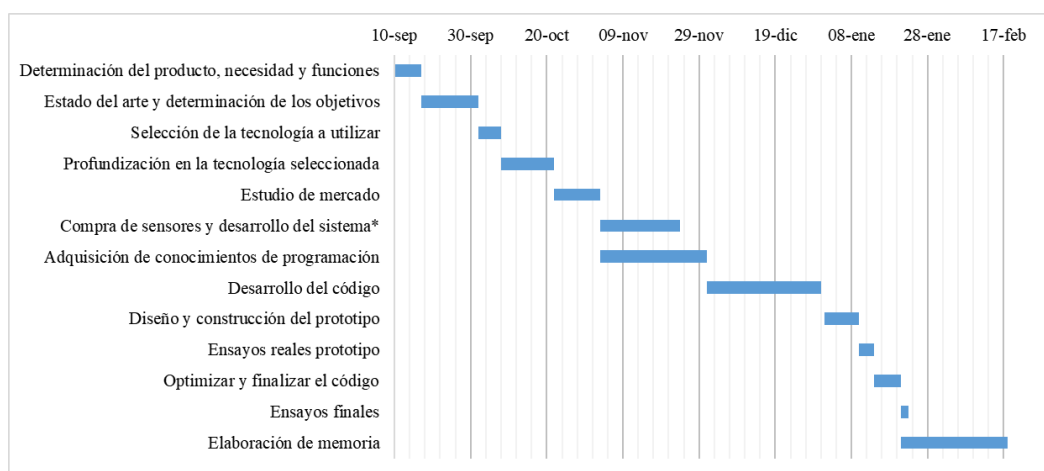


Fig. A. 1. Diagrama de Gantt.

Anexo B. Código Arduino

Código sin anotaciones

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Leddar.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F,20,4);
LeddarOne Leddar1(115200,1);

int presion1 = A0;
int presion2 = A1;
int fuerza1;
byte LED = 7;
const int buzzer = 10;

void setup()
{
    Serial.begin(115200);

    lcd.init();
    lcd.setBacklight(HIGH);

    Leddar1.init();
    pinMode(LED,OUTPUT);
    pinMode(buzzer,OUTPUT);

    lcd.print("Desarrollado por:  ");
    lcd.setCursor(1,2);
    lcd.print("Carlos Gil Garcia");

    delay(2000);

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(2,1);
    lcd.print("Inicializando...");
    lcd.setCursor(5,2);
    lcd.print("LeddarOne");
    delay(2000);
}

void loop()
{
    unsigned int Distancia1 = 0;
    unsigned int Distancia2 = 0;
    int Velocidad = 0;
    float Tiempo = 0;

    fuerza1 = analogRead(presion1);
    fuerza2 = analogRead(presion2);

    char Resultado = Leddar1.getDetections();

    if (Resultado >= 0)
    {
        Distancia1 = Leddar1.Detections[0].Distance;
```

```

Leddar1.clearDetections();

delay(50);

Leddar1.getDetections();

Distancia2 = Leddar1.Detections[0].Distance;
Velocidad = (Distancia1 - Distancia2)*0.040453825;
Tiempo = ((Distancia2/1216.755688)/(Velocidad/3.6));

if (Velocidad >= 0 && Velocidad < 200)
{
  lcd.home();
  lcd.print("Velocidad:    km/h  ");
  lcd.setCursor(10,0);
  lcd.print(Velocidad);
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Distancia:    m      ");
  lcd.setCursor(10,1);
  lcd.print(Distancia2/1216.755688);
  lcd.setCursor(0,2);
  lcd.print("Tiempo restante:  s");
  lcd.setCursor(16,2);
  lcd.print(Tiempo);

  if (Tiempo > 0 && Tiempo < 3)

  {
    if(fuerza1 < 100 && fuerza2 < 100)
    {
      lcd.setCursor(0,3);
      lcd.print("Puede salir          ");
    }
    else if(fuerza1 > 100 && fuerza2 < 100)
    {
      lcd.setCursor(0,3);
      lcd.print("Bloqueo p. delantera");
      tone (buzzer, 10000);
      digitalWrite(LED, HIGH);
    }
    else if(fuerza1 < 100 && fuerza2 > 100)
    {
      lcd.setCursor(0,3);
      lcd.print("Bloqueo p. trasera  ");
      tone (buzzer, 10000);
      digitalWrite(LED, HIGH);
    }
    else
    {
      lcd.setCursor(0,3);
      lcd.print("Bloqueo 2 puertas  ");
      tone (buzzer, 10000);
      digitalWrite(LED, HIGH);
    }
  }
}
else
{
  lcd.home();
  lcd.setCursor(0,3);
  lcd.print("Puede salir          ");
  noTone (buzzer);
}

```

```
        digitalWrite(LED, LOW);
    }
}

else
{
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Error:                ");
    lcd.setCursor(7,0);
    lcd.print((int)Resultado);
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Leddar1 No Conectado");
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("                ");
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("                ");
}
delay(50);
}
```

Código con anotaciones

```
/* Código desarrollado por:
 *
 * Carlos Gil García, Universidad Carlos III
 *
 * Trabajo fin de Grado:
 *
 * Diseño e implementación de un Sistema de Detección Preventiva de
Obstáculos en Vehículos Tipo Turismo
 *
 * El lenguaje usado es Arduino y se emplean los siguientes
componentes:
 *
 * Arduino Mega 2560 R3
 * Leddar One UART 3.3V
 * Módulo LCD 20x4 I2C
 *
 * Se representa en el LCD:
 * La velocidad en km/h del obstáculo que se aproxima
 * La distancia a la que se encuentra en metros
 * El tiempo restante de llegada del obstáculo en segundos
 * La situación actual del sistema de bloqueo de puertas
 *
 *
 * Este código está desarrollado para evitar abrir una puerta del
turismo ante una situación peligrosa.
 *
 * El mecanismo bloqueará la puerta, además de avisar con una señal
acústica y luminosa.
 *
 * Se ha configurado el código para un lateral del vehículo que
incluye:
 * El sensor Leddar One (TM), dos sensores de fuerza FSR, dos
pestillos de seguridad.
 *
 * Este mismo código se podría extrapolar exactamente igual para el
otro lateral del vehículo, usando la misma placa de Arduino u otra
secundaria.
 */

// Librerías necesarias para el código del sistema.
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Leddar.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F,20,4); // Define la dirección I2C del LCD
20x4.

LeddarOne Leddar1(115200,1);
// Velocidad de transmisión = 115200
// ID Modbus = 01

int presion1 = A0; // Pin análogo A0 para el FSR puerta delantera.
int presion2 = A1; // Pin análogo A1 para el FSR puerta trasera
int fuerza1; // Variable correspondiente al asiento delantero.
int fuerza2; // Variable correspondiente al asiento trasero.
byte LED = 7; // Pin digital 7 para la variable correspondiente al
led.
```

```

const int buzzer = 10; // Pin digital 10 para la variable
correspondiente al altavoz/zumbador piezoeléctrico.
// Nota: la idea fundamental tanto del led como del buzzer es de
alertar al ocupante de que se encuentra en una situación peligrosa a
la hora de abrir la puerta.
// Sin embargo, no es necesario alertarle constantemente; es por esto
que ambos sólo notificarán la alerta cuando el vehículo esté parado.
En esta situación, el sistema puede prever que algún ocupante puede
abandonar el vehículo.
// Lo mismo ocurrirá con el bloqueo inteligente de puertas.

void setup()
{
    Serial.begin(115200); //Inicio conexión serial a 115200 bps.

    lcd.init();
    lcd.setBacklight(HIGH); //Inicio de la pantalla LCD.

    Leddar1.init(); //Inicio del Leddar One.

    pinMode(LED,OUTPUT); // Asignación LED como pin de salida
    pinMode(buzzer,OUTPUT); // Asignación buzzer como pin de salida

    lcd.print("Desarrollado por:  ");
    lcd.setCursor(1,2);
    lcd.print("Carlos Gil Garcia");

    delay(2000);

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(2,1);
    lcd.print("Inicializando...");
    lcd.setCursor(5,2);
    lcd.print("LeddarOne");
    delay(2000);
}

void loop()
{
    unsigned int Distancial = 0; // Variable correspondiente a la
primera distancia del obstáculo.
    unsigned int Distancia2 = 0; // Variable correspondiente a la
segunda distancia del obstáculo.
    // Nota: Se denominan las variables distancia de tipo 'unsigned' ya
que sólo se van a tomar valores positivos y las distancias en negativo
no existen.
    int Velocidad = 0; // Variable correspondiente a la velocidad
instantánea del obstáculo.
    // Nota: es importante que la velocidad sea una variable de tipo
'int' capaz de obtener valores positivos y negativos.
    // Ya que si es negativa (resultado de restar ambas distancias)
quiere decir que el obstáculo se aleja.
    // Para este caso es necesario distinguir si el obstáculo se
aproxima o se aleja, ya que sólo es una circunstancia de peligro
cuando el obstáculo se aproxima.
    // Si se utiliza una variable de tipo 'unsigned', la velocidad
siempre será positiva independientemente de si el obstáculo se aleja o
acerca.
    float Tiempo = 0; // Variable correspondiente al tiempo que el
obstáculo tarda en llegar al LiDAR.

```


// Nota: Es de tipo float ya que es interesante que capte valores en segundos con sus decimales.

// Nota: Al igual que ocurría con las distancias, también es interesante que esta variable sea de tipo 'unsigned'.

// Sin embargo, en código Arduino no existen variables de tipo decimal con signo sólo positivo.

// Para solventar esto, en la función loop se impondrá la condición de que sólo se muestren los valores de tiempo cuando la velocidad sea mayor que cero.

```
fuerza1 = analogRead(presion1); // Lectura análoga del FSR de la
puerta delantera.
```

```
fuerza2 = analogRead(presion2); // Lectura análoga del FSR de la
puerta trasera.
```

```
char Resultado = Leddar1.getDetections(); // Recupera las
detecciones del Leddar, las almacena en la matriz Detections [].
```

```
if (Resultado >= 0)
{
    Distancia1 = Leddar1.Detections[0].Distance; // Array que muestra
sólo la primera detección (en [0]).
```

```
Leddar1.clearDetections(); // Se limpia el Array para obtener
nuevas detecciones.
```

```
delay(50); // delay de 50 milisegundos para tomar la segunda
distancia.
```

```
Leddar1.getDetections(); // El Leddar vuelve a tomar nuevas
medidas después del delay de 50 milisegundos.
```

```
Distancia2 = Leddar1.Detections[0].Distance; // Array que
contiene las nuevas medidas y muestra sólo la primera detección.
```

```
Velocidad = (Distancia1 - Distancia2)*0.040453825; // Cálculo de
la velocidad en km/h resultado del producto de la diferencia de
velocidades por la ponderación calculada en el Anexo E.
```

```
Tiempo = ((Distancia2/1216.755688)/(Velocidad/3.6)); // Tiempo
restante del obstáculo en segundos que tarda en llegar al sensor.
```

// Nota: En el cálculo del tiempo se ha tenido en cuenta la posibilidad de que el obstáculo que se aproxima NO vaya a velocidad constante, por lo que el tiempo se calculará en función de la velocidad medida en cada instante de tiempo.

```
if (Velocidad >= 0 && Velocidad < 200) // El sensor estará
limitado desde 0 hasta los 200 km/h.
```

// Nota: es importante considerar una velocidad superior a los 0 km/h, ya que velocidades negativas indican que el obstáculo detectado se aleja en vez de aproximarse, y esa situación no es peligrosa.

```
{
    lcd.home();
    lcd.print("Velocidad:    km/h  ");
    lcd.setCursor(10,0);
    lcd.print(Velocidad);
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Distancia:    m      ");
    lcd.setCursor(10,1);
    lcd.print(Distancia2/1216.755688);
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("Tiempo restante:  s");
    lcd.setCursor(16,2);
```

```

    lcd.print(Tiempo);

    if (Tiempo > 0 && Tiempo < 3) // Intervalo de tiempo de salida
del ocupante del vehículo de 3 segundos.
    // Nota: El sistema realizará el bloqueo de puertas sólo cuando
el tiempo restante del obstáculo que se aproxima es inferior a 3
segundos.
    {
        if(fuerza1 < 100 && fuerza2 < 100)
        {
            lcd.setCursor(0,3);
            lcd.print("Puede salir          ");
        }
        else if(fuerza1 > 100 && fuerza2 < 100)
        {
            lcd.setCursor(0,3);
            lcd.print("Bloqueo p. delantera");
            tone (buzzer, 10000); // El buzzer envía una señal acústica de
10KHz.
            digitalWrite(LED, HIGH); // Enciende el led.
        }
        else if(fuerza1 < 100 && fuerza2 > 100)
        {
            lcd.setCursor(0,3);
            lcd.print("Bloqueo p. trasera ");
            tone (buzzer, 10000); // El buzzer envía una señal acústica de
1KHz.
            digitalWrite(LED, HIGH); // Enciende el led.
        }
        else
        {
            lcd.setCursor(0,3);
            lcd.print("Bloqueo 2 puertas ");
            tone (buzzer, 10000); // El buzzer envía una señal acústica de
1KHz.
            digitalWrite(LED, HIGH); // Enciende el led.
        }
    }
    else
    {
        lcd.home();
        lcd.setCursor(0,3);
        lcd.print("Puede salir          ");
        noTone (buzzer); // El buzzer deja de enviar señal acústica.
        digitalWrite(LED, LOW); // Apaga el led.
    }
}

else // Valores obtenidos del Leddar One negativos, no hay conexión
entre el sensor y Arduino.
{
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Error:          ");
    lcd.setCursor(7,0);
    lcd.print((int)Resultado);
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Leddar1 No Conectado");
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("          ");
    lcd.setCursor(0,3);

```

```
        lcd.print("
    }
    delay(50);
}
```

Anexo C. Planos

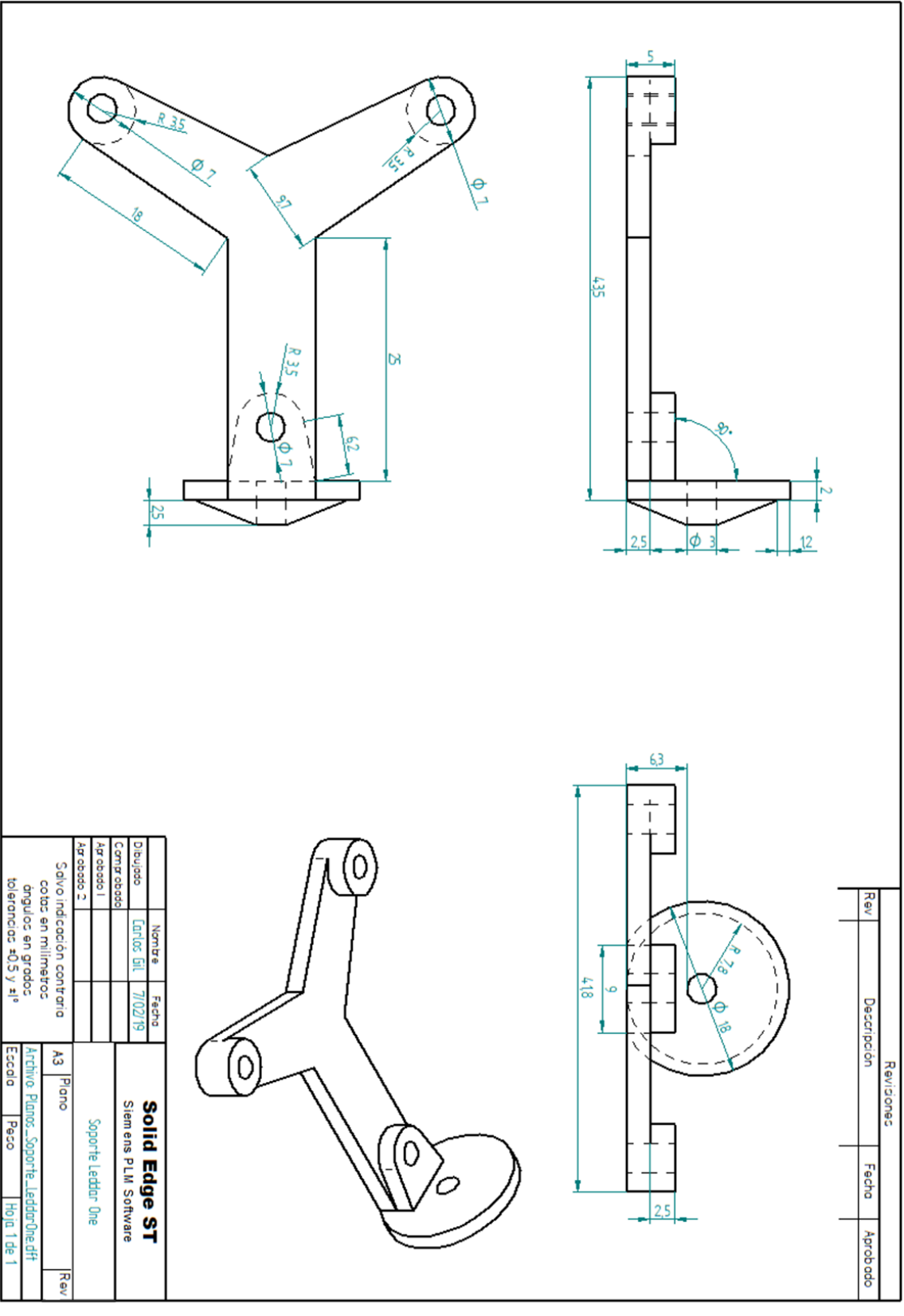


Fig. C. 1. Plano Soporte Leddar One.

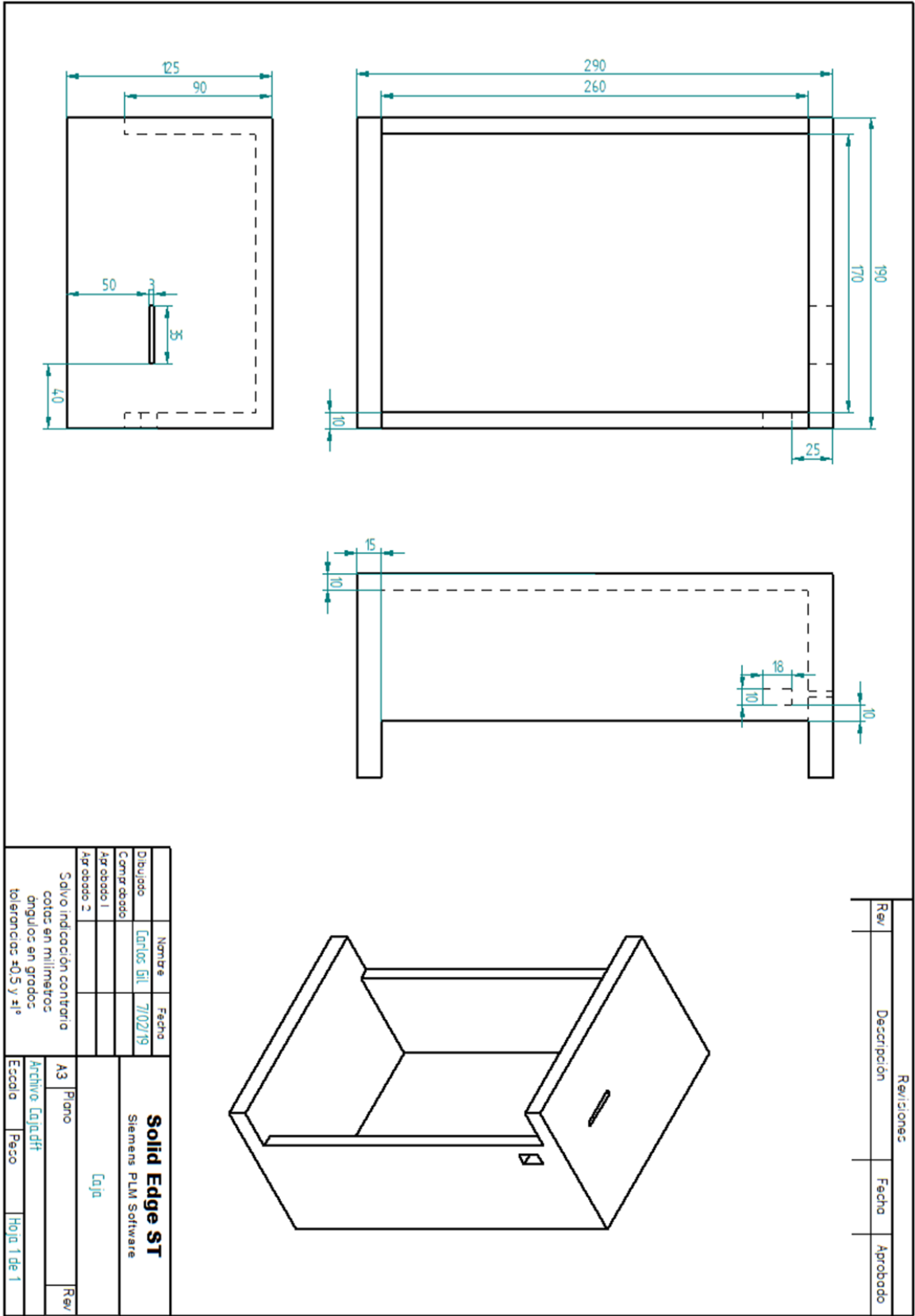


Fig. C. 2. Plano Caja.

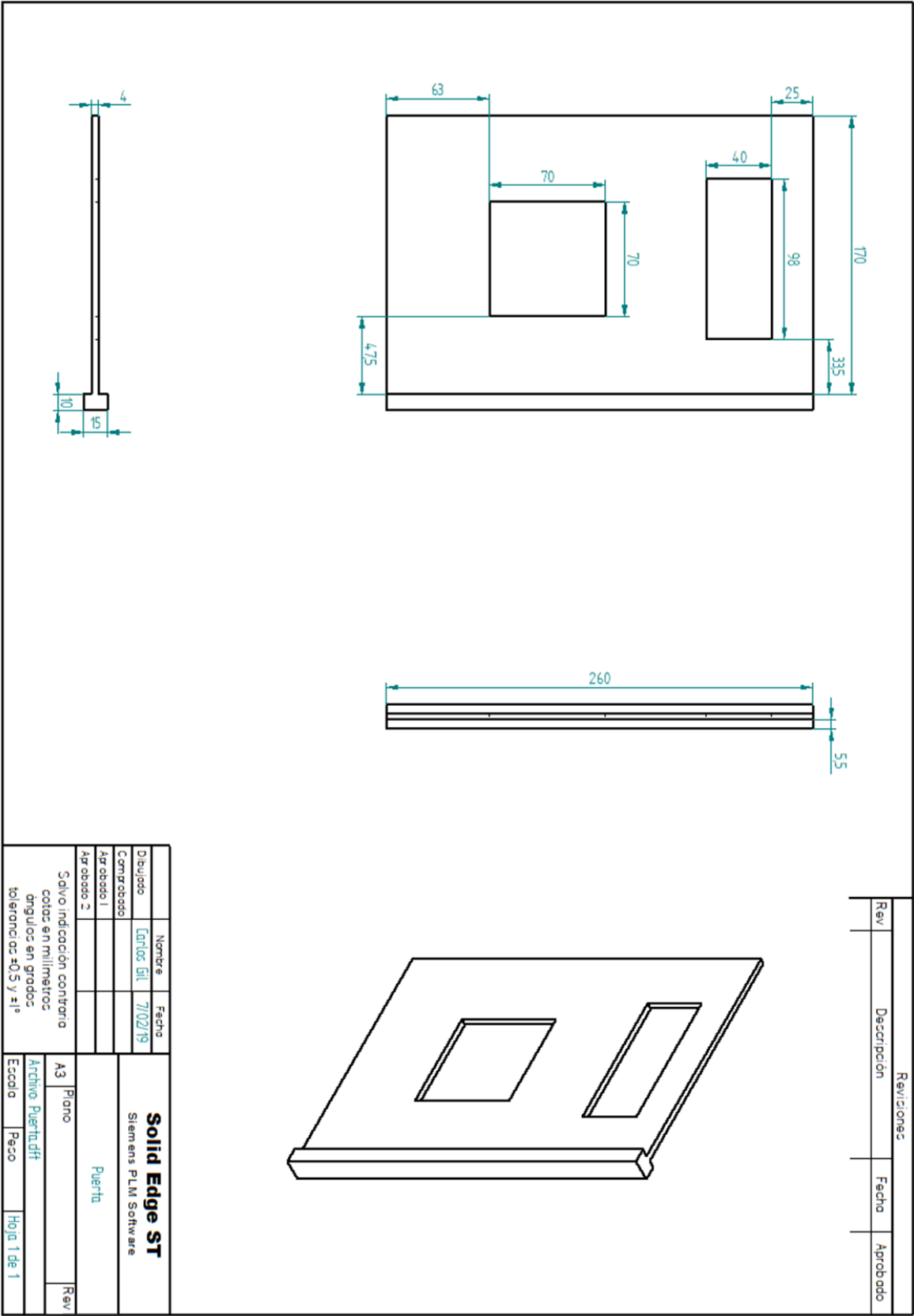


Fig. C. 3. Plano Puerta.

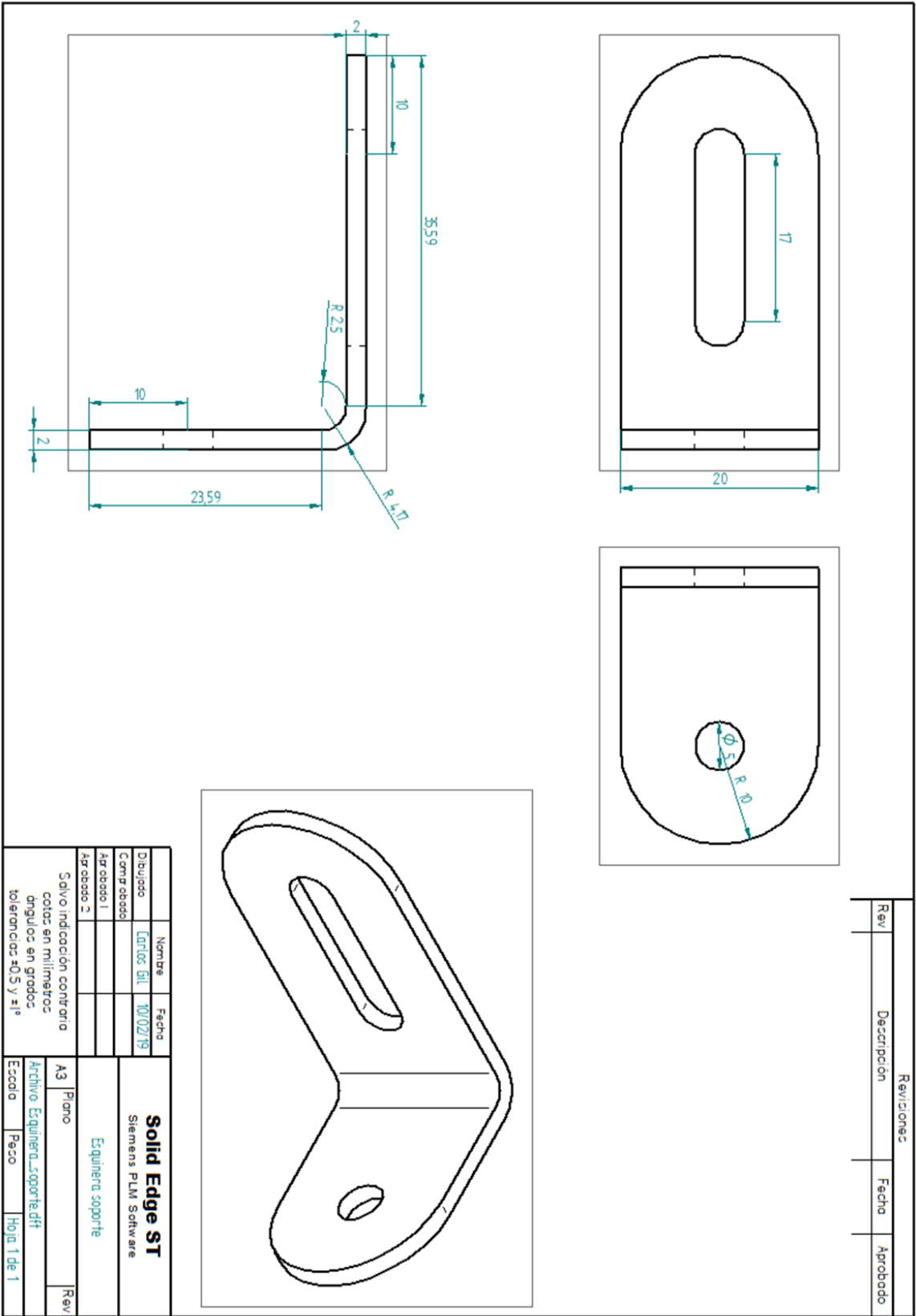


Fig. C. 4. Plano Esquinera Soporte.

Anexo D. Ensamblaje

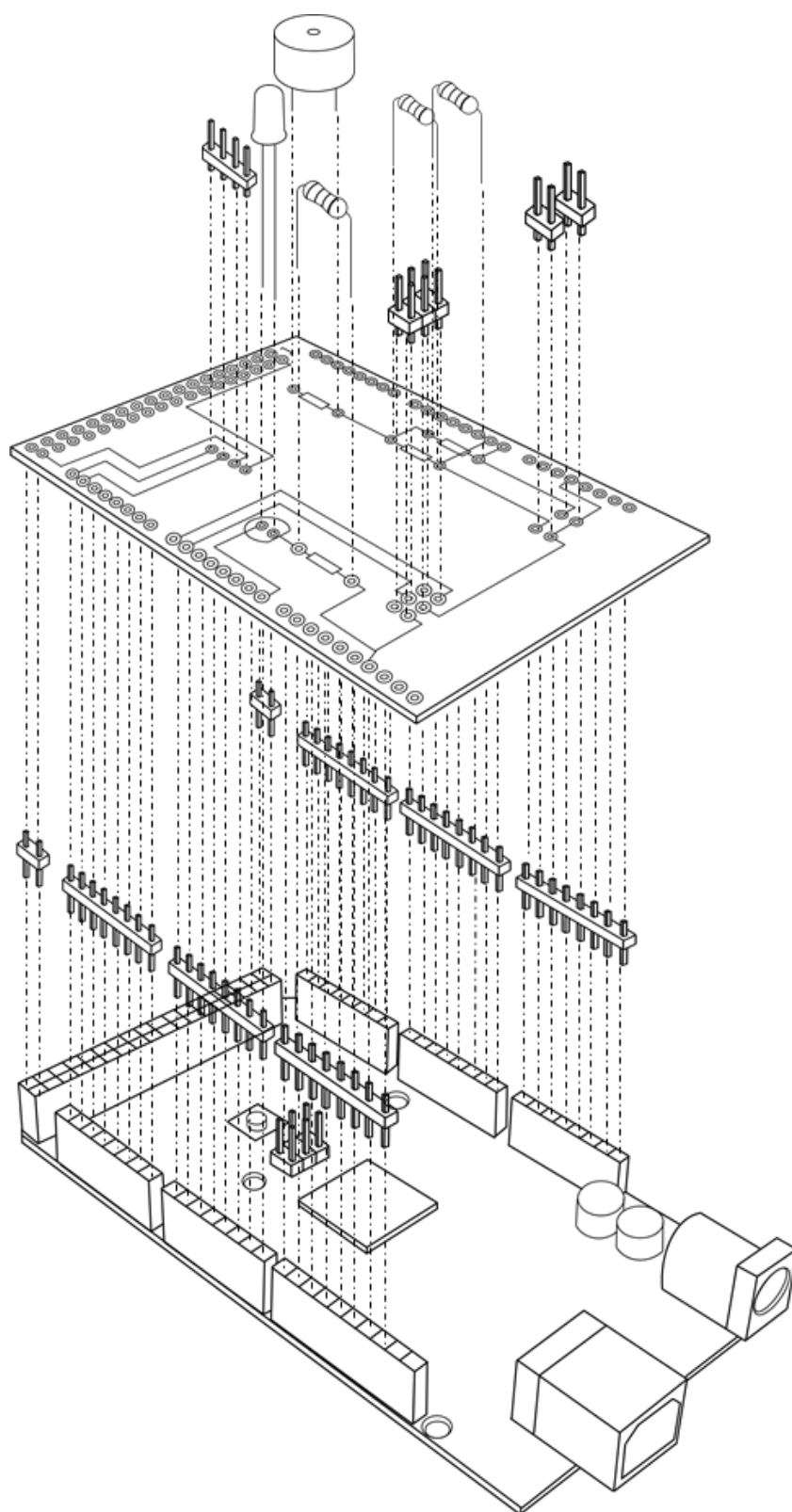


Fig. D. 1. Montaje eléctrico.

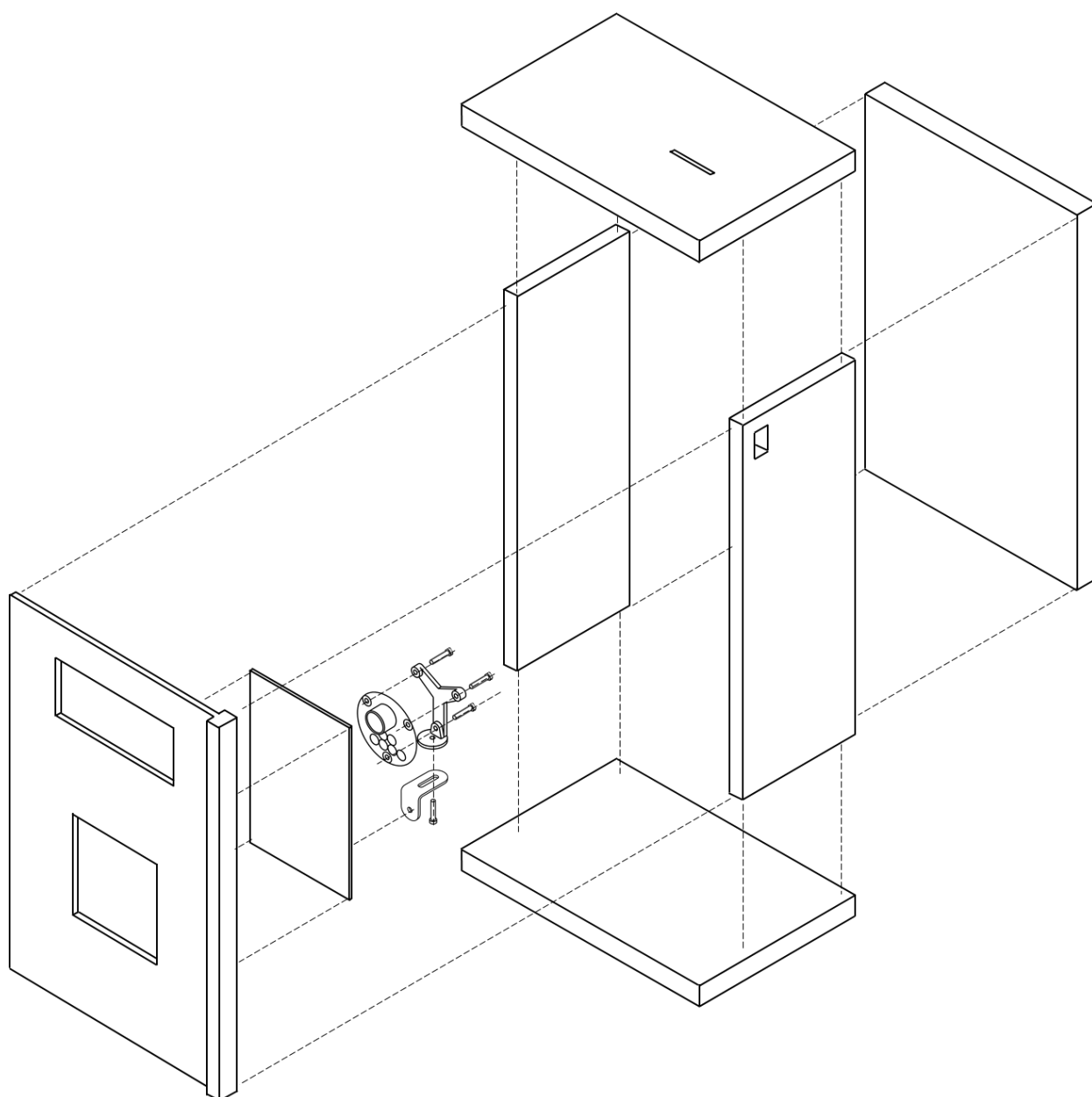


Fig. D. 1. Montaje mecánico

Anexo E. Método de media de ponderaciones

TABLA E. 1. RELACIÓN VALORES OBTENIDOS VS DATOS REALES

Datos reales (cm)	Datos experimentales	Ponderación	Media	Dato final (cm)	Error
15	296	19,7333333	17,7987356	16,63039484	11%
20	374	18,7	17,7987356	21,01272861	5%
25	456	18,24	17,7987356	25,61979745	2%
30	516	17,2	17,7987356	28,99082343	3%
35	588	16,8	17,7987356	33,03605461	6%
40	683	17,075	17,7987356	38,37351241	4%
45	752	16,7111111	17,7987356	42,25019229	6%
50	915	18,3	17,7987356	51,4081462	3%
55	985	17,9090909	17,7987356	55,34100985	1%
60	1091	18,1833333	17,7987356	61,29648908	2%
65	1177	18,1076923	17,7987356	66,12829298	2%
70	1273	18,1857143	17,7987356	71,52193455	2%
75	1373	18,3066667	17,7987356	77,14031119	3%
80	1449	18,1125	17,7987356	81,41027743	2%
85	1527	17,9647059	17,7987356	85,7926112	1%
90	1594	17,7111111	17,7987356	89,55692355	0%
95	1656	17,4315789	17,7987356	93,04031706	2%
100	1764	17,64	17,7987356	99,10816383	1%

TABLA E. 2. PONDERACIÓN APLICABLE PARA LA DISTANCIA Y LA VELOCIDAD

Media Ponderación	17,7987356
Ponderación a metros	1779,87356
Ponderación (m)	0,00056184
Ponderación (m/s)	0,01123675
Ponderación (km/h)	0,04045231

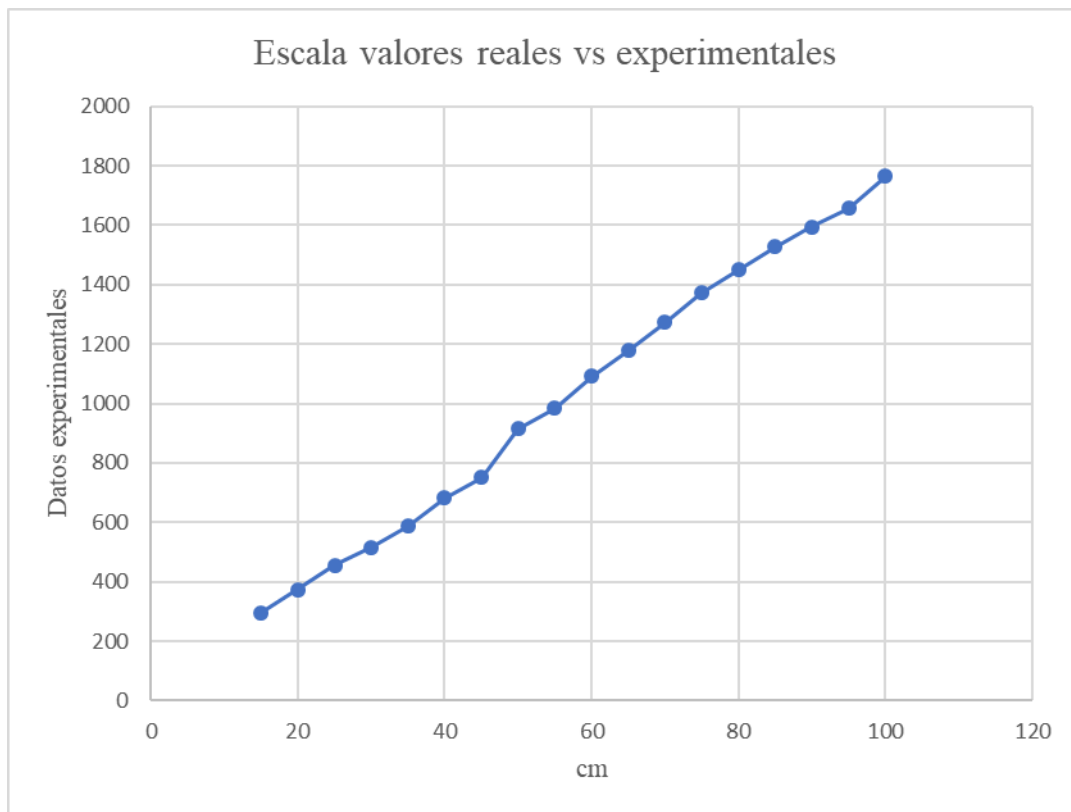


Fig. E. 1. Progresión lineal de valores obtenidos en relación a los datos reales.